



2013

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

Transporte Pneumático de Granulados em Fase Diluída

MESTRADO EM EQUIPAMENTOS E SISTEMAS MECÂNICOS

AUTOR | Filipe Daniel Rodrigues da Cruz

ORIENTADOR | Prof. Doutor Luís Filipe Borrego

Coimbra, dezembro, 2013

Transporte pneumático de granulados em fase diluída

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica Equipamentos e Sistemas Mecânicos Área de Especialização em
Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Filipe Daniel Rodrigues da Cruz

Orientador

Prof. Doutor Luís Filipe Borrego

Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Dezembro de 2013

Agradecimentos

Um especial agradecimento ao meu orientador de mestrado Prof. Doutor Luís Borrego que foi incansável no tratamento das minhas solicitações, que de uma forma exemplar e muito humana tomou todas as diligências para a sua resolução.

Ao Eng.º Garcia Mendes que teve um papel fulcral na orientação da elaboração do projeto desde a fase de projeto até a fase de implementação, transmitindo sempre a sabedoria e experiência para a melhor resolução possível.

A todos os colegas de curso que tiveram um papel fulcral para o meu término com sucesso, esta fase de estudos devido a minha frequência deslocada do curso.

Aos meus pais por todo o amor e apoio incondicional, pelos ensinamentos que me deram e os valores que me inculcaram...

Ao meu irmão Fernando Cruz, pelas palavras de apoio e carinho que sempre teve para comigo.

A Sílvia, pelo amor e dedicação, pela paciência, e principalmente pela partilha do dia-a-dia e pelas palavras de incentivo nesta caminhada.

A todos os meus amigos, especialmente ao Sérgio Mendes, pela amizade sincera, e pelos auxílios constantes sem nunca olhar para trás.

Às minhas origens, onde nasci e cresci, o meu enorme sentimento de gratidão pela pessoa que sou hoje.

A todos aqueles que me esqueci de referenciar, mas que foram importantes na minha vida, o meu muito obrigada.

A Deus e/ou Universo por todas as ajudas que não me foram evidentes.

Filipe Cruz - Dezembro 2013

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci

Resumo

Este trabalho de projeto aborda de forma pratica o cálculo de sistemas de transporte pneumático em fase diluída, sendo esta uma das formas mais difundidas e que apresenta mais vantagens, por forma a fazer o transporte de materiais granulados na indústria. O trabalho analisa o transporte de material granulado “fertilizante orgânico” onde o cálculo incidu sobretudo sobre o dimensionamento do circuito de transporte e do ciclone de separação ar/sólidos.

Para o cálculo dos sistemas foram utilizadas as expressões analíticas disponíveis na bibliografia e para o cálculo dos sistemas de separação utilizou-se o *software* de cálculo numérico por elementos finitos *SolidWorks®* com a potencialidade *CFD Flow Simulation®*.

O trabalho de implementação e teste verificou a aproximação dos elementos de cálculo aos ensaios realizados, no entanto verificou-se que existe alguma falta de investigação nesta área por forma a facultar dados concretos para a inserção no cálculo de sistemas de transporte pneumático, assim como uma unidade de teste desta natureza.

Palavras-chave: Transporte Pneumático Fase diluída; Granulados; *CFD Flow Simulation®*; *SolidWorks®*;

Abstract

This project addresses, in a very practical approach, the calculation of pneumatic conveying in dilute phase, being this one of the most widespread and with more advantages in order to make the transport of granular materials in industry. The work analyses the transport of granular material "organic fertilizer" which focused primarily on the calculation of the scaling circuit transport and cyclone air / solids.

The systems calculations were performed using analytical expressions available in the literature and for the separation systems calculation the software of finite element analyses SolidWorks®, with the Flow Simulation CFD® capability, was used.

The implementation work and testing verified the approach of component data user tests, however it was found that there is a lack of research in this area in order to provide concrete data for inclusion in the calculation of pneumatic conveying systems, as well as a unite test.

Keywords: Phase Pneumatic Conveying diluted; Granules, CFD Flow Simulation®, SolidWorks®;

Índice

Índice	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Simbologia e Siglas	xi
Simbologia	xi
Siglas	xiv
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Trabalho relacionado	1
1.3. Contribuições significativas	2
1.4. Estrutura do Trabalho de Projeto	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Considerações gerais sobre transporte pneumático	5
2.2. Sistemas de transporte pneumático	7
2.2.1. Fases do transporte pneumático	10
2.2.1.1. Transporte pneumático em fase densa	15
2.2.1.2. Transporte pneumático em fase diluída	16
2.2.1.3. Comparação dos dois sistemas de transporte pneumáticos de sólidos.	17
2.2.2. Transporte pneumático a pressão positiva e negativa.	18
2.2.2.1. Sistema de transporte a pressão positiva.	19
2.2.2.2. Sistema de transporte a pressão negativa.	19
2.2.2.3. Sistema de pressão negativa e positiva combinadas.	20
2.3. Partículas transportadas: classificação, atrito, velocidade, perda de carga e distribuição	21
2.3.1. Classificação de partículas finas de GELDART	21
2.3.2. Influência do atrito de partículas	22
2.3.3. Velocidade para o transporte em fase diluída	24
2.3.4. Velocidade de afogamento no transporte vertical	26
2.3.5. Velocidade de saltitação no transporte horizontal	28
2.3.6. Cálculo da perda de carga	36

2.4.5. Resumo da revisão bibliográfica	41
3. Principais componentes do transporte pneumático.....	42
3.1. Ciclone.....	42
3.2. Sopradores	43
3.2.1. Ventiladores centrífugos	43
3.2.1 Ventiladores Multiestágios	44
3.2.3. Compressor de Palhetas.....	44
3.2.4. Compressor de Lóbulos Rotativos.....	45
3.3. Circuito de Transporte.....	47
3.3.1. Conduitas	47
3.3.2. Curvas ou mudanças de direção	47
4. Características dos produtos transportados	50
4.1. Densidade relativa e dimensão da partícula	50
4.2. Ângulo de deslizamento e ângulo de repouso	50
4.3. Abrasividade do produto.....	51
4.4. Materiais higroscópios	52
4.5. Material explosivo	52
4.6. Produto tóxico ou corrosivo.....	52
4.7. Ponto de fusão	53
4.8. Índice de humidade.....	53
4.9. Eletricidade estática	53
4.10. Outros problemas	53
5. Metodologia de projeto de fase diluída.....	55
5.1 Aspectos de projeto de transporte de sólidos em fase diluída	55
6. Projeto do sistema de transporte pneumático em fase diluída de fertilizante orgânico	56
6.1. Caracterização do produto a transportar e local de instalação.	57
6.2. Cálculo do caudal massico do sistema	59
6.3. Definição do comprimento equivalente da instalação	61
6.4. Seleção do diâmetro interno da tubagem	66
6.5. Seleção da perda de carga do sistema	66
6.6. Seleção da velocidade do ar de transporte.....	66
6.7. Seleção do caudal mássico de ar de transporte.....	67
6.8. Seleção da relação de sólidos de transporte.	68

6.9. Verificação da perda de carga do sistema.	68
6.10. Potência necessária do sistema.	69
6.11. Seleção da bomba de vácuo para o sistema.	70
6.12. Verificação da velocidade de saltitação do produto.	72
6.13. Seleção e dimensionamento do ciclone.	73
6.14. Avaliação do ciclone por elementos finitos.	79
7. Apresentação de resultados.	86
7.1. Caracterização do produto em teste.	86
7.2. Resultados dos ensaios	89
8. Conclusão e sugestão de trabalhos Futuros	97
Referências bibliográficas	99
Anexos	102
Anexo A	103
Anexo B	104
Anexo C	105
Anexo D	107
Anexo E.	108
Anexo F.	110

Índice de Figuras

Figura 1 – Planta de um transporte pneumático [11].....	6
Figura 2 – Zonas de transporte pneumático [2].....	9
Figura 3 – Padrões de fluxo numa tubagem horizontal [1].....	11
Figura 4 – Regimes de escoamentos em tubulação horizontal [1].	12
Figura 5 – Mudança da fase diluída para a fase densa. v é a velocidade do ar e G o caudal de sólidos [1].....	13
Figura 6 – As características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo em golpes “slug” [1].	14
Figura 7 – As características da fase diluída [1].	15
Figura 8 – Linha de transporte em fase densa [7].....	16
Figura 9 – Transporte de fase diluída [7].	17
Figura 10 – Sistema com transporte a pressão positiva [3].	19
Figura 11 – Sistema de pressão negativa [3].....	20
Figura 12 – Sistema se pressão positiva e negativa [3].....	21
Figura 13 – Diagrama de GELDART (1973) [10]. Sendo ρ_p a densidade das partículas e d_m o diâmetro medio das partículas.....	22
Figura 14 – Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás. V_{CH} e a velocidade de afogamento “shocking” (Rhodes, 2004) [18].	27
Figura 15 – Modelo conceitual de diferentes regimes de escoamento em sistemas de dutos horizontais, conforme SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21].	31
Figura 16 - Diagrama de fase para transporte pneumático horizontal de fase diluída (RHODES, 2004) [18].....	33
Figura 17 – Elementos de queda de pressão para sistema de pressão positiva (JONES, 1988) [14].	39
Figura 18 – Filtro ciclone [4].....	42
Figura 19 – Rotor radial fechado, Rotor Radial aberto com disco, Rotor radial aberto, Pás curvadas para trás [5].	43
Figura 20 – Ventilador multiestágios [32].	44
Figura 21 – Esquema de funcionamento de uma bomba de palhetas de um estágio [33].	45
Figura 22 – Funcionamento de um compressor tipo <i>Roots</i> [33].....	46
Figura 23 – Compressor de Lóbulos Rotativos [34].....	46
Figura 24 – Exemplo de desgaste de um tubo [5].....	47
Figura 25 – Ação da força centrífuga [5].	48
Figura 26 – Exemplos de Curvas de raio longo.	49
Figura 27 – ω =Ângulo de deslizamento [5].	50
Figura 28 – Ângulos de talude em repouso e de escoamento: α = ângulo de repouso e β = ângulo de escoamento [5].....	51
Figura 29 – Diagrama lógico de projeto pneumático baseado no modelo matemático [2].	56
Figura 30 – Aspeto da granulometria de produto Bom a ser transportado.	57
Figura 31 – Diagrama de Geldart, para o transporte pneumático de fertilizante orgânico.	59

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características dos sistemas pneumáticos em fase densa e diluída [1].....	11
Tabela 2 – Comparação do transporte pneumático em fase densa e diluída.	18
Tabela 3 – Separação de partículas por GELDART (1973) [10].....	21
Tabela 4 – Velocidades de alguns materiais (GOMIDE, 1983) [16].....	25
Tabela 5 – Escala de dureza de Mohs [5].	52
Tabela 6 – Tabela de caracterização do produto.	58
Tabela 7 – Tabela descritiva do local de instalação.	58
Tabela 8 – Quadro resumo das características da Tubagem de transporte pneumático.	63
Tabela 9 – Comprimentos equivalentes das curvas utilizadas.....	65
Tabela 10 – Comprimentos equivalentes da Tubagem.....	65
Tabela 11 – Comprimentos equivalentes para os troços de tubagem.	69
Tabela 12 – Relações geométricas padronizadas entre os componentes de um ciclone de entrada tangencial [4].	75
Tabela 13 – Dados fonte da instalação para dimensionamento do ciclone.	76
Tabela 14 – Distribuição do tamanho das partículas.	77
Tabela 15 – Relações características do ciclone dimensionado.....	77
Tabela 16 – Eficiência da coleta.	78
Tabela 17 – Eficiência da coleta obtida através do cálculo de elementos finitos.....	85
Tabela 18 – Tabela de caracterização do produto (* na linha de finos utilizou-se o mesmo produto por forma a testar a linha de finos).	88
Tabela 19 – Tabela descritiva do local de instalação.	88
Tabela 20 – Distribuição granulométrica do tamanho das partículas de teste.	88
Tabela 21 – Dados retirados dos ensaios retirados nas várias linhas de transporte.	89
Tabela 22 – Tabela comparativa dos valores de perda de carga nas diversas linhas de transporte pneumático.....	90
Tabela 23 – Tabela comparativa dos valores de caudal massico nas diversas linhas de transporte pneumático.....	91
Tabela 24 – Tabela comparativa das eficiências de separação nas diversas linhas de transporte.....	93

Simbologia e Siglas

Simbologia

X - Relação de massa de sólido transportado [kg sólidos/kg ar]

V_t - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s]

V_{th} - Velocidade de transporte horizontal [m/s]

V_{tv} - Velocidade de transporte vertical [m/s]

V_f - Velocidade de flutuação do fluido em condutas verticais e horizontais [m/s]

V_g - Velocidade do gás [m/s]

V_{ch} - Velocidade de afogamento “Shocking” [m/s]

V_{gs} - Velocidade de saltitação [m/s]

$V_{20\%}$ - Velocidade de admissão de produto [m/s]

V_i - Velocidade do gás na entrada do ciclone [m/s]

ΔP_t - Perda de carga total [kg/m²]

Δp – Perda de Carga na conduta de ar [Pa]

ΔP_e - Perda de carga dos equipamentos [Pa]

ΔP_a - Perda de carga por aceleração das partículas [Pa]

Δp_g - Perda de carga do gás [Pa]

Δp_{conv} – Perda de carga na linha de transporte [Pa]

P_a – Pressão de aceleração de partículas [mm.c.a]

p_1 - Pressão de entrada da tubagem [kN/m²]

p_2 - Pressão de saída da tubagem [kN/m²]

$\Delta P/\Delta L$ - Gradiente de Pressão [adm.]

d_p - Diâmetro da partícula [μm]

d_m - Diâmetro médio das partículas [μm]

d - Diâmetro interno da tubagem [m]

d_p^* - Diâmetro crítico [m]

D/d - Rácio entre diâmetro da curva e diâmetro interno da curva [adm.]

D - Diâmetro da curva [m]

D_s - Diâmetro de saída [m]

ρ_p - Densidade das partículas [kg/m³]

ρ_g - Densidade do gás [kg/m³]

γ_{par} - Densidade da partícula [kg/m³]

γ_{par} - Densidade da Partícula [Kg/m³]:

A - Área da secção transversal [m²]

$a \times b$ - Área de entrada [m²]

W_s - Caudal massico de sólidos [kg/s]

W_g - Caudal massico de gás [Kg/s];

C - Capacidade do sistema [Kg/s]

Q_g - Caudal volúmico de gás de transporte [m³/s]

Q_s - Caudal volúmico de sólidos de transporte [m³/s]

C_i - Concentração de partículas na entrada [g/ m³]

μ_g - Viscosidade do gás [Kg/ms]

g - Aceleração da gravidade [m/s²]

Fr_p - Número de Froude das partículas [adm.]

Re_p - Número de Reynolds das partículas [adm.]

$Re_{p\ crit}$ - Número de Reynolds crítico das partículas [adm.]

L_t - Comprimento total [m]

L_e - Comprimento equivalente [m]

L - Comprimento da linha [m]

Z - Altitude [m]

φ - Fator de redução [adm.]

f - Fator de fricção [adm.]

α - Fração volumétrica de sólidos [adm.]

ω - Ângulo de Deslizamento [°]

α - Ângulo de Repouso [°]

β - Ângulo de Escoamento [°]

T_{amb} - Temperatura média ambiente [K]

T_1 - Temperatura de admissão de produto [K];

Φ - Teor de humidade relativa [%];

d_{corte} - Diâmetro de corte do ciclone [μm]

b – Largura da entrada do ciclone [m]

N_V – Número de voltas do vortex

Siglas

PVC – Policloreto de Vinilo

PP – Polipropileno

PMC – “*Pressure Minimum Curve*” - Curva de Pressão Mínima

1. Introdução

1.1. Motivação

Todo o trabalho do presente estudo foi desenvolvido no âmbito do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Este trabalho teve como principal ponto de partida o projeto de âmbito empresarial efetuado numa empresa de projeto de sistemas e processo industriais. O projeto esteve em desenvolvimento no ano de 2012 pela empresa, sendo que a fase de testes finais não tiveram lugar até a data de entrega deste trabalho.

No decorrer do projeto foi evidente a falta de um documento guia fidedigno de cálculo para um caso prático de transporte pneumático em fase diluída. Onde o departamento de projeto obtivesse uma base para este tipo de cálculo, e assim de uma forma bastante prática poder elaborar projeto sem necessidade de consultas de bibliografia numa fase inicial do projeto.

É também ponto de motivação a elaboração de modelo numérico para o cálculo de ciclones orientados para a sua melhor eficiência, sendo que os modelos numéricos semi-empíricos existentes datam de alguns anos e são elaborados com base em produtos granulados tipo, de que são exemplo o PVC, PP, Açúcar, etc.

1.2. Trabalho relacionado

O trabalho de projeto foi elaborado com a contribuição de diversas publicações científicas (artigos, dissertações, livros, relatórios técnicos, etc.), que revelaram ser uma mais-valia para o seu desenvolvimento. Nesta secção é feita uma seleção dos trabalhos mais relevantes, assim como uma breve descrição.

Não foram encontrados na pesquisa bibliográfica efetuada, nenhum trabalho de cariz idêntico a este documento, o que como já foi referido, muito contribui para a elaboração e

motivação do mesmo. Foram sim, tidos em conta diversos autores, na sua maioria através de manuais, onde se puderam consultar casos práticos de diversos produtos e para diversas tecnologias de transporte pneumático, de onde foram assimiladas as metodologias de cálculo e adaptadas entre elas, por forma a conseguir uma metodologia acessível e pratica, no entanto não tao exhaustiva quanto seria desejado.

1.3. Contribuições significativas

Das diversas fontes consultadas considero que algumas delas são a base deste trabalho, sendo que neste ponto refiro a sua abrangência temática, por forma a dar a perceber não só a abrangência do tema como que a importância dos autores e as suas publicações.

O livro *“Pneumatic Conveying of Solids”* dos autores G.E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L.S. Leung†, 2009 [1], foi de extrema importância para a elaboração do trabalho. Esta obra aborda toda a problemática do transporte pneumático nas diversas tecnologias de transporte existentes, demonstrando ser um livro exaustivo no que se refere á abordagem teórica e prática pois tem também nos seus capítulos finais várias abordagens de cálculo para diversos exemplos técnicos de transporte e diversos produtos.

Também com grande influência no trabalho de projeto teve o livro *“Pneumatic Conveying Design Guide”* de Davis Milles, 2004 [2], esta obra tal como o livro referido anteriormente até disposto de uma forma muito abrangente no que refere ao transporte pneumático industrial, sendo que apresenta soluções de cálculo bastante desenvolvidas para de uma forma prática o Engenheiro de projeto aplicar.

No âmbito da caracterização do produto foi tido em conta o livro *“Powders and Bulk Solids”* do autor D. Schlze, 2008 [3], esta obra apesar de não ter sido evidente neste trabalho foi muito importante na aprendizagem dos aspetos referentes ao produto e deste modo fundamental nas questões de armazenagem doseamento que foram elaboradas no Projeto não tendo sido abordadas nesta obra.

1.4. Estrutura do Trabalho de Projeto

Este documento encontra-se dividido em duas partes principais; uma primeira, onde é descrito todo o trabalho de pesquisa bibliográfica; e uma segunda, onde os métodos são descritos e aplicados. Assim, segue-se uma breve passagem por todos os capítulos.

Capítulo 2. É feita uma descrição do estado da arte no transporte Pneumático bem como apresentando toda a base de cálculo numérica para este tipo de sistemas

Capítulo 3. Neste capítulo é feita uma breve descrição dos equipamentos constituintes do transporte pneumático, incidindo apenas naqueles que serão alvo de cálculo neste trabalho.

Capítulo 4. São apresentados alguns pormenores importantes das características dos produtos granulados.

Capítulo 5. Explanação do procedimento de cálculo de sistemas de transporte pneumático de fase diluída a ser abordado neste trabalho.

Capítulo 6. Projeto elaborado para o cálculo do sistema de transporte pneumático de fase diluída de fertilizante orgânico, neste capítulo serão abordadas todos os cálculos que estiveram implicados no dimensionamento das condutas de transporte, o sistema motriz de ar comprimido e o elemento separador gás/ sólido.

Capítulo 7. Neste capítulo foram apresentados todos componentes implementados assim como a sintetização dos resultados obtidos, por forma a realizar comparação com o obtido no cálculo numérico e por elementos finitos.

Capítulo 8. Por fim apresenta-se em forma de conclusão o resumo sumário do projeto assim como a indicação de trabalhos futuros a efetuar.

2. Revisão Bibliográfica

O Transporte pneumático é a mais importante operação industrial de processos de transporte de materiais granulados ou polvorentos secos em ambiente gasoso que pode ser o ar ou um outro gás (necessidade de evitar ambientes de risco explosivos).

O transporte pneumático é uma operação unitária de grande importância na indústria pelo facto de representar grande importância na economia global de processos. Em alguns casos o custo pode atingir cerca de 80% do custo total da operação.

Para que ocorra esta movimentação, há necessidade de se ter uma quantidade de ar constante e controlável, de forma a se obter um fluxo contínuo de ar sob pressão.

A combinação das três variáveis é muito importante para a eficiência do transporte pneumático: volume, velocidade e pressão de ar. Dependendo das características físicas de cada material, haverá uma ou mais formas de transporta-lo pneumáticamente.

Como já foi referido o transporte pneumático de partículas sólidas é um dos processos mais vantajosos no transporte de materiais sólidos na indústria. Na última década, houve uma melhoria da qualidade de projeto desta tecnologia, o que requer um bom conhecimento da dinâmica do escoamento da mistura gás/sólido em condutas.

A utilização do ar para a movimentação de materiais sólidos apresenta vantagens em comparação com a movimentação mecânica (elevadores, transportadores helicoidais, telas transportadoras, etc.), pois oferece maior segurança ao produto uma vez que o mesmo é transportado por meio de condutas, onde o ar como fluido possibilita o seu escoamento até o local pretendido, vantagens ao nível do desgaste e deterioração dos produtos a transportar e o caudal de transporte a alcançar são fatores decisivos na escolha desta tecnologia.

Desta forma o Transporte pneumático é um processo industrial que requer um estudo aprofundado de todos os seus fatores intervenientes, fatores estes, que em muitos casos não estão devidamente acessíveis ao Departamento de Engenharia.

São importantes para o projeto de um transporte pneumático as seguintes propriedades do sólido: granulometria e forma das partículas, densidade real e aparente, ângulo de repouso dinâmico, fragilidade, humidade, mobilidade, dureza e características de abrasão, aderência e aglomeração.

2.1. Considerações gerais sobre transporte pneumático

O primeiro sistema de transporte pneumático documentado data de 1847 pela autoria da fábrica *Peugeot*[®] localizada na cidade de *Valentigney* em França, na extração de poeiras provenientes de sistemas de moagem de pedra [9].

O segundo sistema terá sido patenteado pela *Crompton's*[®], “Melhorias na moagem, preparação e queima de carvão” de 1868 [9].

Apesar disso a empresa *B.F. Sturtevant Company*[®] transcreve que o seu fundador foi o primeiro a usar ar no transporte de materiais fluidizados no pós-revolução industrial, que em 1864 começou as experiências primárias na remoção do pó em operações de moagem, polimento, etc.. A empresa *B.F. Sturtevant Company*[®], desenvolveu um transportador pneumático para materiais leves como a madeira de serragem, papel e algodão, produtos com características não abrasivas que podiam passar através das pás do ventilador [10].

Hoje em dia, o transporte pneumático é utilizado em várias aplicações de armazenagem e transporte, sendo utilizado para transporte de materiais a granel em fábrica, armazéns, áreas de carga e descarga de ferrovias e portos marítimos, descarregamento pressurizado de contentores, para controlo e seleção de materiais em silos e para muitas outras finalidades similares.

Existe uma grande variedade de materiais granulados secos e em pó que são transportados com eficiência através desta tecnologia, como o cimento, carvão em pó, grãos, alumina, apatita, cinzas, algodão, carvão moído, madeira de serragem, granulado de PVC, Resina de PVC, Carbonato de cálcio, Dióxido de Titânio e muitos outros produtos, de uma maneira geral todos os produtos polvorentos e granulados são suscetíveis de serem

transportados através de transporte pneumático, variando sim, a forma e método do transporte para assim se adaptar melhor as especificações de cada produto.

Este tipo de transporte pode ser usado então para partículas que variam dos pós finos a granulados, com granulometrias de $10\mu\text{m}$ até 10mm e densidades aparentes de 16 a $3200 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ respetivamente. A Figura 1 mostra exemplos de vários segmentos que usam transporte pneumático para transporte de sólidos.

O transporte pneumático consiste então, no transporte a granel de materiais através da movimentação de ar numa conduta. O princípio de operação é semelhante em todos os tipos de instalações de transporte pneumático. A Figura 1 mostra em forma de exemplo vários tipos de operações de transporte pneumático.

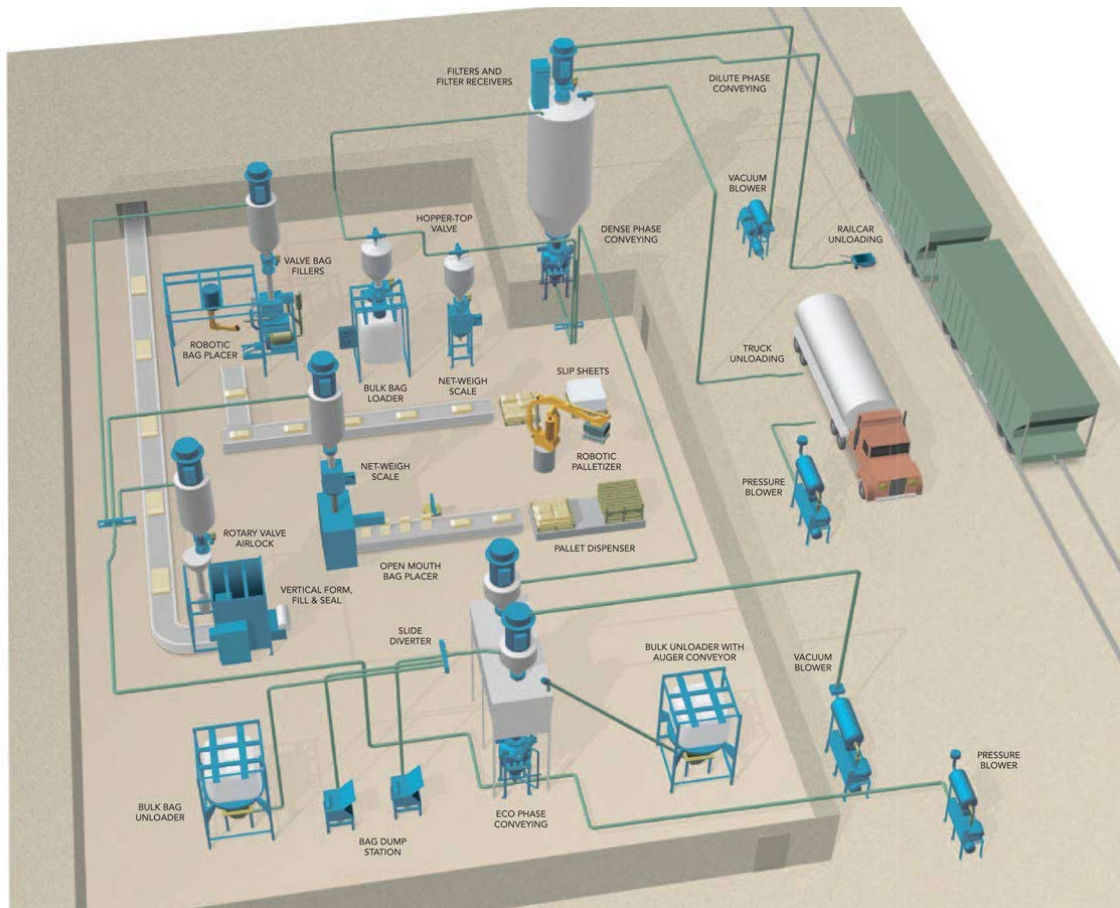


Figura 1 – Planta de um transporte pneumático [11].

2.2. Sistemas de transporte pneumático

Hoje em dia existem várias formas de transporte pneumático por forma a transportar produtos de várias dimensões. A capacidade e as principais características dos transportadores pneumáticos variam bastante dentro de uma grande variedade de equipamentos. Em forma de exemplo, existem instalações com a capacidade de transportar até 8000 [Kg/h] apenas numa linha de transporte. Uma instalação sem transferência intermédia pode transportar material até 1800 [m] de distância e a 100 [m] de altura, dependendo sempre estes valores das características do produto.

O transporte pneumático de materiais tem um número significativo de vantagens, as mais importantes são [1]:

- Transporte isento de poeiras para uma grande variedade de produtos;
- Flexibilidade no traçado das condutas - pode ser transportada na vertical e horizontal por meio de utilização de curvas no traçado;
- Distribuição do produto para diferentes locais e a partir de diferentes locais na área industrial;
- Reduzida manutenção e baixo custo de mão-de-obra;
- Para múltiplas utilizações, pois as condutas de transporte podem ser usadas no transporte de diferentes materiais;
- Apresenta segurança no transporte pois as condutas podem ser usadas no transporte de produtos de grande valor;
- Facilidade de automação e controlo.

Desvantagens do transporte pneumático:

- Alto consumo de potência;
- Desgaste e abrasão do equipamento;
- O incorreto projeto do sistema de transporte pneumático pode resultar na degradação do produto a transportar;
- Limitação nas distâncias de transporte;

- Por motivos de complexidade dos fenómenos que intervêm no transporte pneumático, é necessário um bom conhecimento de projeto de sistemas de transporte pneumático.

Podem ainda ser enumeradas outras vantagens [2], tais como:

- Eliminação de formações de poeiras no ambiente (transporte sem poluição atmosférica);
- Redução de perdas de produto durante o processo de transporte;
- Elimina a possibilidade do contacto do produto com superfícies húmidas durante o transporte;
- Possibilidade de transporte aéreo e interno das instalações fabris;
- Possibilita traçados de transporte com percurso sinuoso da tubagem;
- Facilidade de adaptação aos edifícios existentes da tubagem de transporte;
- Proteção do material transportado contra a poluição;
- Possibilita a utilização gases neutros durante o transporte;
- Realização de instalações podendo integrar conjuntos completamente automatizados;
- Higiene e segurança no trabalho de transporte do produto.

Em alguns casos, o transporte pneumático não é aconselhado, de entre outros, os mais importantes são:

- Sólidos muito húmidos ou viscosos;
- Dimensões das partículas, massas volumétricas muito grandes requerem velocidades de gás por vezes excessivas;
- Temperatura da material elevada;
- Partículas muito frágeis, que podem sofrer reduções de tamanho durante o transporte.

Desta forma o transporte pneumático é essencialmente composto por quatro zonas distintas, em que cada uma delas necessita equipamentos específicos para realizar a sua função. As quatro zonas de transporte pneumático estão representadas na Figura 2.

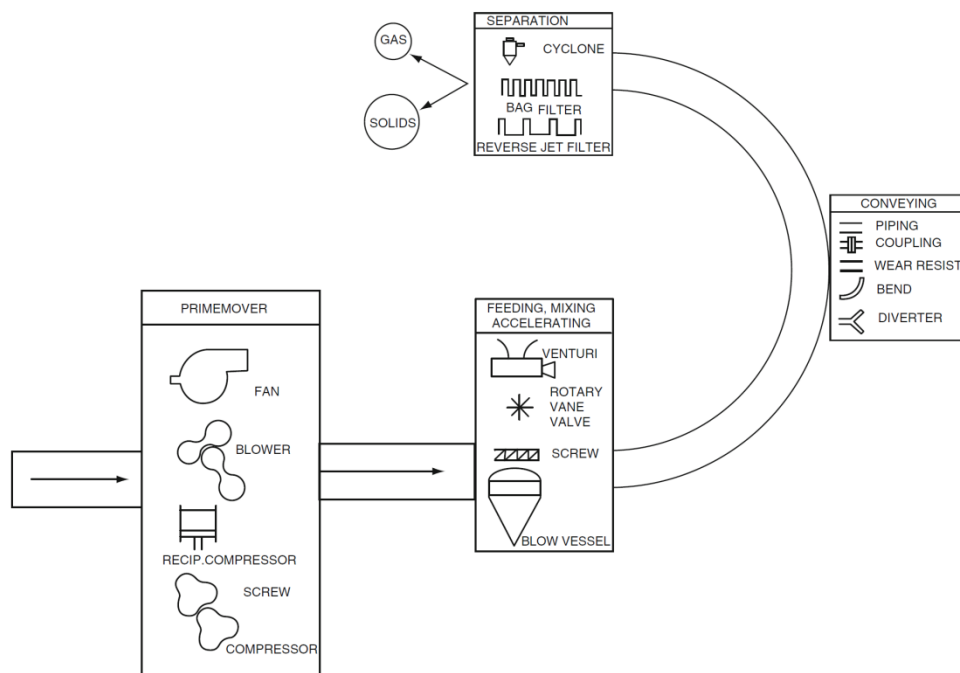


Figura 2 – Zonas de transporte pneumático [2]

O **sistema motriz** é usado para fornecer a energia necessária ao transportador por meio de compressores, sopradores, ventiladores e bombas de vácuo. Para efetuar um transporte eficiente, deve-se determinar a velocidade do gás, o caudal e a pressão de trabalho (positiva ou negativa).

Zona de Alimentação Mistura e Aceleração - esta zona é crucial em qualquer sistema de transporte pneumático, é onde as partículas são adicionadas ao gás de transporte. Essencialmente o momento crucial ocorre quando as partículas em repouso são misturadas com um gás em movimento. Associado a este fenómeno é também muito importante a zona de aceleração das partículas, se o layout permitir, esta zona consiste numa conduta horizontal com o comprimento necessário para o produto entrar em regime estável normalmente assume-se que este comprimento deve ser de igual ou superior a $25 \times$ Diâmetro da conduta [2].

Zona de transporte - Uma vez ultrapassada a zona de aceleração do produto, este entra em zona de transporte, que consiste essencialmente em tubagens, estes são

selecionados sob ponto de vista de variados fatores, incluído abrasividade do produto, pressão necessária, etc.

A zona de transporte é assim constituída também por curvas e válvulas de desvio, pois existe a necessidade de mudança de direção do produto. Pelo facto de existir uma mudança de direção e por isso se verificar uma desaceleração do produto é necessário introduzir novamente uma zona de aceleração [2].

Separação Gás/Sólidos - Nesta zona realiza-se a separação do produto do gás de transporte. A seleção do separador gás/sólido adequado é dependente de variados fatores, onde o principal é a dimensão dos sólidos a serem separados do gás de transporte, entre outros fatores que serão tratados mais tarde nesta tese [2].

2.2.1. Fases do transporte pneumático

A seleção de um sistema pneumático de transporte depende de um bom conhecimento das tecnologias existentes, as suas vantagens e aplicações. Existem várias formas de classificar o tipo de transporte pneumático, mas a característica que mais se adequa para a sua classificação é a concentração gás/sólido no sistema de transporte. Sobre este ponto de vista, o transporte pneumático pode ser classificado em duas categorias [1]:

- **Transporte pneumático de fase densa** no qual as partículas sólidas não são completamente suspensas utilizando alta pressão e baixa velocidade de transporte;
- **Transporte pneumático fase diluída** usando grandes caudais de ar a velocidades elevadas, desta forma mantendo as partículas completamente suspensas.

As principais características dos sistemas de transporte pneumático podem ser observadas na Tabela 1, esta tabela explana de forma clara as principais diferenças:

Tipo de Transporte	X - Relação de massa de sólido transportado [kg sólidos/kg ar]	V_t - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s]	Δp – Perda de Carga [KPa]
Fase densa	>15	<10	>100
Fase diluída	0-15	>10	<100

Tabela 1 – Características dos sistemas pneumáticos em fase densa e diluída [1].

Um esquema padrão de fluxos horizontais pode ser visto na Figura 3, observa-se que uma redução na velocidade do gás, para a mesma alimentação de sólido, resulta numa distribuição não uniforme na secção transversal da linha de transporte. O ponto entre a região de fluxo estável e instável, é chamada de **velocidade de saltitação**. Dependendo das características do sólido, velocidade do gás, caudal mássico de sólidos e outros fatores como a rugosidade e dimensão da tubulação, os padrões de fluxo na fase diluída podem variar do regime instável para o estável ou ainda para um regime intermédio.

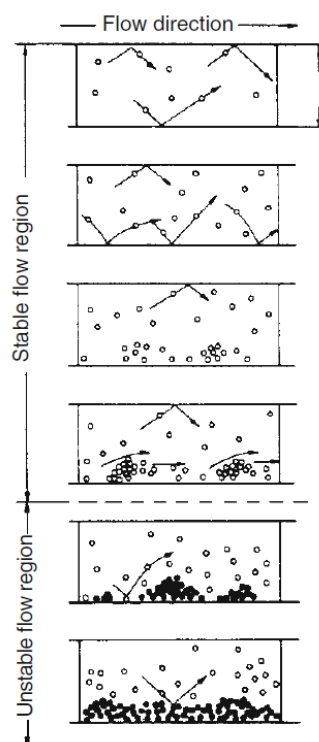


Figura 3 – Padrões de fluxo numa tubagem horizontal [1].

Os padrões das fases de escoamento podem variar bruscamente, podendo colmatar a secção da tubagem, ocasionando um escoamento denso ou gerando escoamentos nos quais os sólidos no fundo da conduta movem-se como uma serie de dunas e com uma camada de fase diluída a mover-se sobre elas. As situações de escoamentos estáveis resultam num processo de escoamento suave, enquanto que as situações instáveis são caracterizadas por violentos aumentos de pressão conforme a camada móvel se quebra [1].

Dentro de cada tipo de fase (diluída ou densa) [1], podem-se verificar vários tipos de regimes de escoamento. A Figura 4 mostra as diferenças destes tipos de escoamentos através da visualização de regimes em troços de tubos horizontais, nas quais a velocidade do ar de transporte vai sendo diminuída gradualmente e o caudal de sólidos permanecendo constante. Estes regimes são basicamente uma função das características dos sólidos.

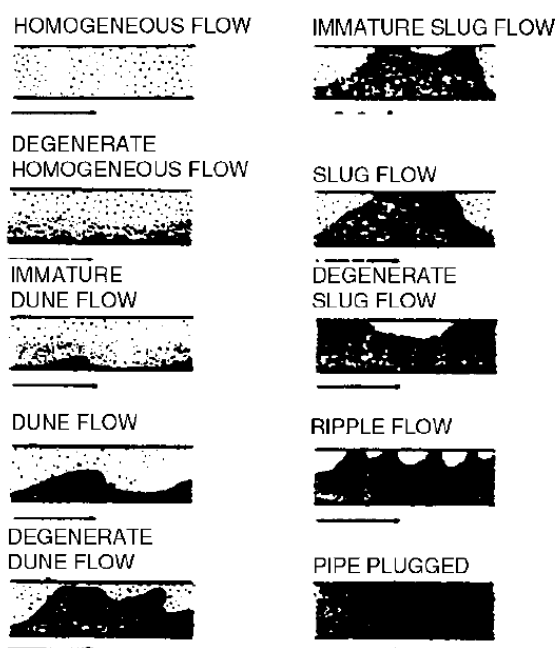


Figura 4 – Regimes de escoamentos em tubulação horizontal [1].

Os materiais sólidos de propriedades diferentes como tamanho, distribuição, forma, densidade e superfície podem ser transportados pneumáticamente em sistemas convencionais em três formas de fluxo:

- Transição suave da fase densa para a fase diluída, típica de sólidos finos ou polvorentos como cimento, carvão pulverizado e cinzas;

- Fase diluída, zona instável e fluxo na forma de golpes “slug”, comum em produtos granulares leves e de fluxo livre como granulados de PVC, arroz, trigo;
- Apenas fase diluída, característica de materiais triturados, granulares pesados como carvão, cimento primário, areia e também alguns materiais leves, fibrosos e esponjosos como lascas de madeira, grão em pó.

A Figura 5 mostra a transição suave da fase diluída para a fase densa. Verifica-se que ao reduzir a velocidade do ar da máxima para mínima e mantendo-se o caudal massico do produto constante, a queda de pressão também diminui, atingindo um valor mínimo. À direita deste ponto mínimo de pressão verifica-se a fase diluída. Entretanto, se a velocidade de ar continuar a diminuir, a queda de pressão aumenta para uma taxa mais alta do que a da fase diluída, esta região é denominada de fase densa. Verifica-se também que, para a mesma velocidade, quanto maior é o caudal de sólidos (G) maior a queda de pressão.

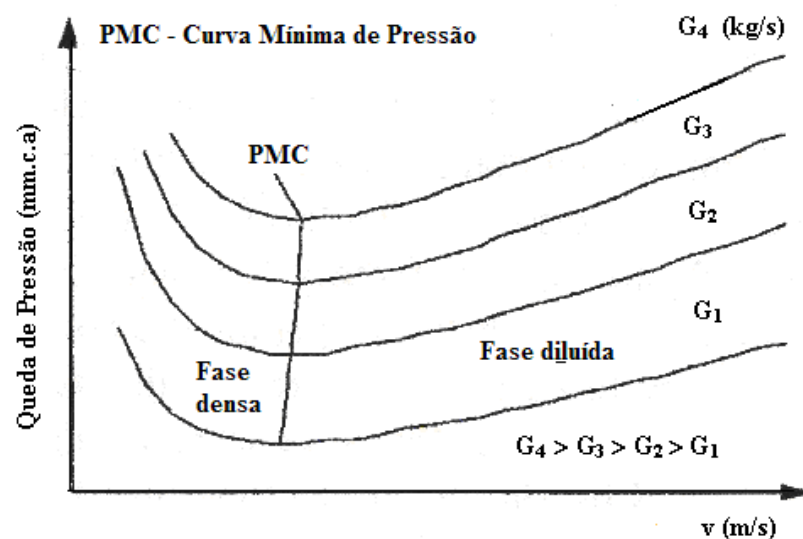


Figura 5 – Mudança da fase diluída para a fase densa. v é a velocidade do ar e G o caudal de sólidos [1].

A Figura 6 apresenta as características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo intermitente. O ponto 1 representa a distribuição das partículas em fase diluída na secção transversal da conduta. O ponto 2 indica o ponto de pressão mínima e a formação de uma camada de partículas na parte inferior da tubagem devido a

redução do caudal massico de ar. Como o caudal massico de ar baixa, algumas partículas tornam-se estacionárias ao longo da parte inferior da tubagem e outras são transportadas em pequenas dunas e agrupamentos. Ao diminuir ainda mais o caudal massico de ar, a velocidade de ar torna-se insuficiente para manter em suspensão as partículas verificando-se então a acumulação de algumas partículas na parte inferior da tubulação e a formação de “*slugs*” longos. Estes “*slugs*” longos são forçados a atravessar a tubagem e produzem flutuações altas de pressão e vibração, formando uma zona instável (ponto 3). No ponto 4 observa-se que ao se reduzir ainda mais a velocidade do ar, o transporte das partículas apresenta-se na forma intermitente. Ao longo da tubagem horizontal os “*slugs*” levantam as partículas da camada da frente e deposita a mesma quantidade de partículas atrás delas.

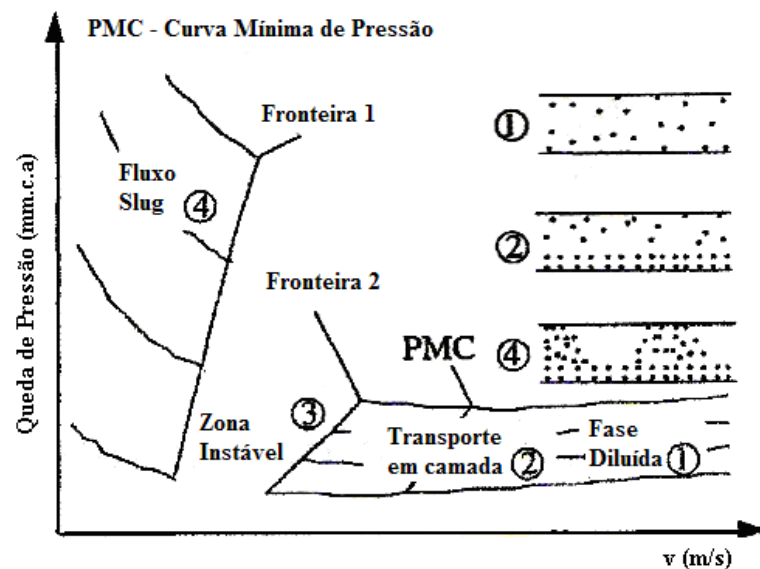


Figura 6 – As características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo em golpes “slug” [1].

Pela Figura 7 observam-se as características da fase diluída. Quando o caudal massico de ar diminui do mais alto para o mais baixo e para um caudal massico de produto estando constante, a queda de pressão também diminui. Antes de alcançar a curva mínima de pressão (PMC), as partículas começam a saltar e acumulam-se rapidamente ao longo da parte inferior da tubagem. O bloqueio ocorre logo que o material preenche completamente uma secção da conduta.

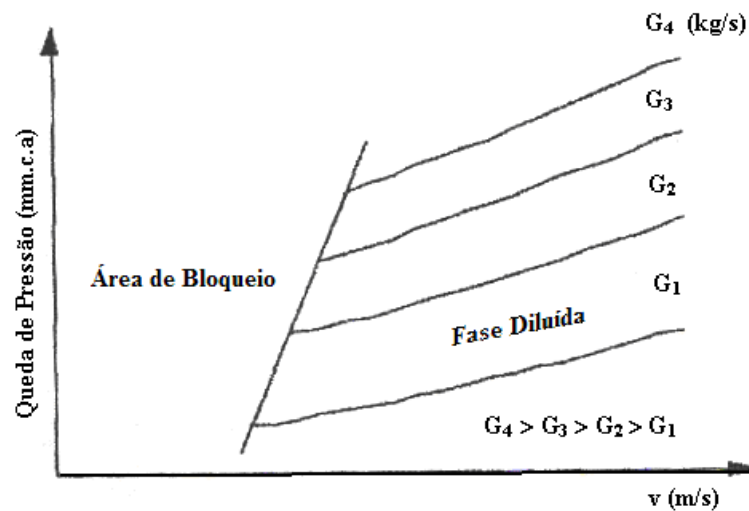


Figura 7 – As características da fase diluída [1].

2.2.1.1. Transporte pneumático em fase densa

Caracteriza-se por transportar sólidos em altas pressões e velocidades muito baixas de 1,5 a 4,0 [m/s] e tubagens com alta concentração de sólidos. O transporte pneumático em fase densa pode ser o método mais favorável e eficiente para a manipulação de uma grande variedade de sólidos secos a granel, quando a integridade de forma do produto é crítica [1].

O transporte pneumático em fase densa caracteriza-se por uma pequena quantidade de ar para movimentar uma grande quantidade de sólidos a granel de forma pulsante, em porções através da linha de transporte, sendo um processo similar a extrusão. A Figura 8 mostra um sistema de transporte pneumático em fase densa.

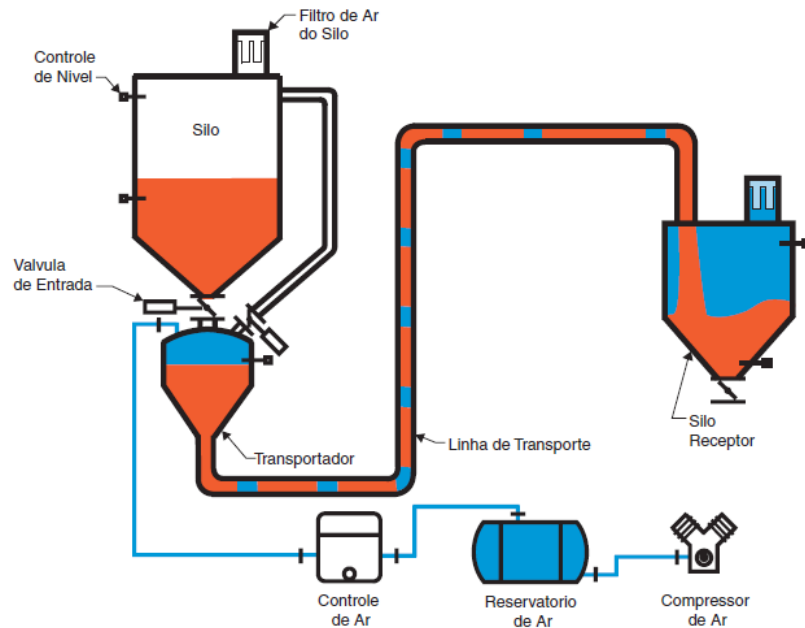


Figura 8 – Linha de transporte em fase densa [7].

O Transporte pneumático fase densa, é utilizado geralmente para o transporte de produtos de alta e media densidade, sensíveis ao calor, semi-abrasivos e produtos muito frágeis. Podem ser aplicados para o transporte de açúcar cristal, açúcar refinado ou pó, amidos, farinhas, chocolate em pó, ou outros com estas características.

2.2.1.2. Transporte pneumático em fase diluída

Com esta definição são caracterizados quase todas as outras formas de transporte pneumático, visto que a concentração de sólidos é muito menor em relação ao volume de gás utilizado no transporte pneumático fase densa. Os sistemas pneumáticos em fase diluída utilizam grande quantidade de gás para remover quantidades relativamente pequenas de material em suspensão a altas velocidades [1].

Este tipo de transporte utiliza fluxo de gás de alta velocidade (fonte de alta pressão ou vácuo) para introduzir material na linha de transporte em estado de suspensão como se verifica na Figura 9.

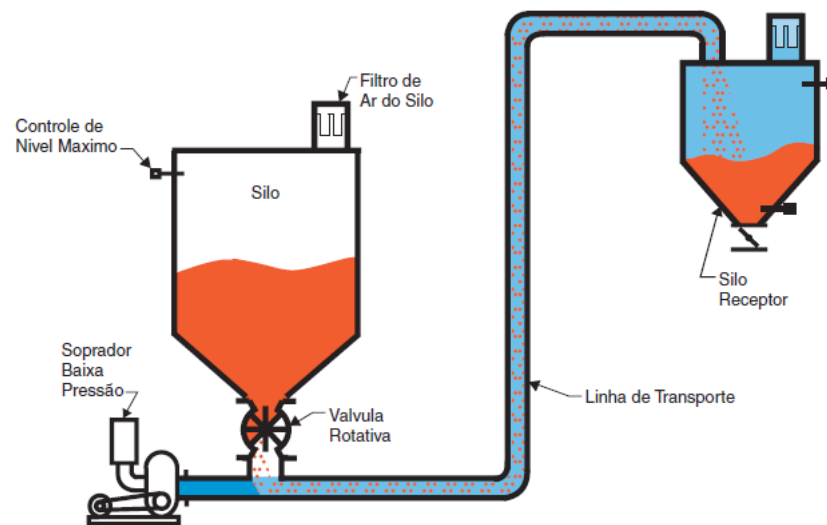


Figura 9 – Transporte de fase diluída [7].

É caracterizado por velocidades de gás maiores que 15 [m/s], baixas relações de sólidos e baixas perdas de carga por unidade de comprimento de linha de transporte. É limitado a pequenas extensões, ao transporte contínuo de sólidos a taxas menores do que 8000 [Kg/h] e é o único sistema capaz de operar sob pressão manométrica negativa. Sob condições de fluxo diluído as partículas sólidas comportam-se como individuais, completamente suspensas no gás, e as forças de interação gás/sólido são predominantes [1].

2.2.1.3. Comparação dos dois sistemas de transporte pneumáticos de sólidos.

De seguida mostra-se uma tabela onde se podem observar as principais características dos dois sistemas, de forma a permitir uma rápida comparação e avaliação dos dois métodos.

Características de comparação	Fase densa	Fase diluída
Produtos para os quais os sistemas melhor se aplicam	Pós ou granulados – Abrasivos, frágeis, pesados, higroscópicos	Pós ou granulados – Não abrasivos, Não frágeis, baixa densidade
Velocidade de transporte	De 0,1 a 2m/s, utilizando-se pressão	Alta acima de 15m/s, utilizando-se sopradores tipo “Roots” ou sopradores centrífugos
Relação pressão e caudal de transporte	Pressões relativamente altas acima de 100 kPa e baixo caudal de ar	Pressões baixa inferiores a 100 kPa alto caudal de ar
Caudal do material transportado	Maior comparado com outros sistemas	Mais baixo comparado com outros sistemas
Desgaste do equipamento	Baixo índice de desgaste da tubagem e diminuição de desgaste em curvas devido a baixas velocidades	Alto índice de desgaste da tubagem e aumento de desgaste em curvas devido a altas velocidades
Custo de implementação	Maior comparado com outros sistemas	Mais baixo comparado com outros sistemas
Custo de manutenção	Mais baixo comparado com outros sistemas	Maior comparado com outros sistemas

Tabela 2 – Comparação do transporte pneumático em fase densa e diluída.

2.2.2. Transporte pneumático a pressão positiva e negativa.

O transporte pneumático pode ser classificado em função do método segundo o qual o produto é transportado, isto é, o transporte pneumático pode ser [1]:

- Pressão negativa (Vácuo);
- Pressão positiva (Pressão);
- Pressão positiva e negativa (combinado).

Os sistemas de pressão negativa permitem a admissão de múltiplos produtos, com uso de válvulas de desvio. Os sistemas de pressão negativa também são mais “sensíveis a distâncias” em relação aos sistemas de pressão positiva, devido ao diferencial limitado de pressão. Já os sistemas de fase diluída sob pressão, podem alcançar um diferencial de pressão elevado mais facilmente. A operação utilizando ambos os métodos (pressão/vácuo) por vezes é ideal para uma determinada instalação de transporte pneumático.

2.2.2.1. Sistema de transporte a pressão positiva.

A pressão positiva é aplicada na maioria de sistemas de descarregamento para a receção de produtos, utilizando a pressão atmosférica, provavelmente a maioria dos transportes pneumáticos por redes de condutas é feita através de pressão positiva.

Uma grande variedade de produtos pode ser transportada com este tipo de sistema. O sistema pode conter inúmeras válvulas de desvio para a alimentação de vários silos de receção que faz a distribuição para linhas de produção, utilizando configurações de desvios conforme as necessidades das linhas de produção. Embora o sistema de múltiplos pontos de alimentação dentro da linha de transporte pneumático seja uma vantagem, o sistema pode encarecer devido a que cada destino tem que ter seu próprio filtro recetor com capacidade de vácuo parcial. Os cuidados de projeto deve ser maiores neste tipo de configuração, em especial, ao volume e pressão de ar usado nas tubulações das linhas de transporte, para não haver variações nos silos recetores de distribuição [3].

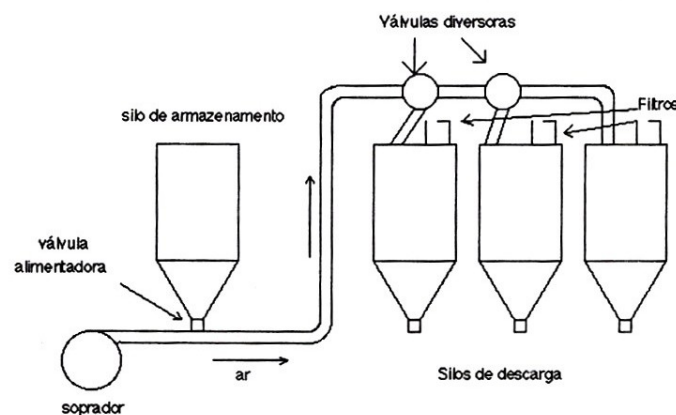


Figura 10 – Sistema com transporte a pressão positiva [3].

2.2.2.2. Sistema de transporte a pressão negativa.

Os sistemas de pressão negativa são mais utilizados para materiais de vários formatos que se querem transportados a partir de vários pontos de receção e para um único ponto de descarga. Não haverá problemas no transporte se ocorrerem pequenas diferenças

de pressão no processo de transporte. As válvulas rotativas e transportadores helicoidais também podem ser utilizadas neste tipo de sistemas. A diferença é que haverá necessidade de um volume de ar maior e os filtros de ar deve estar sob vácuo na operação, também tem limitação em termos de distâncias de transporte pelo facto de as capacidades serem mais baixas [3].

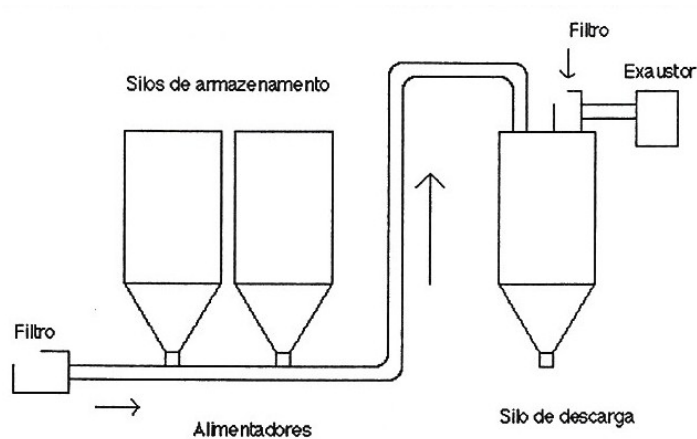


Figura 11 – Sistema de pressão negativa [3].

Este sistema é bastante utilizado no transporte de produtos tóxicos, corrosivos e perigosos, visto que permitem uma alimentação livre de poeiras, para além de fornecerem uma segurança adicional que é a de que qualquer rotura de tubagem, e pelo facto de o transporte ser feito em vácuo, não irá provocar poluição ambiental no espaço fabril.

2.2.2.3. Sistema de pressão negativa e positiva combinadas.

Os sistemas combinados de pressão positiva e negativa são muito versáteis pois podem ser usados para deslocar sólidos de várias fontes de alimentação para múltiplos pontos de descarga, conforme se demonstra na Figura 12

Os sistemas combinados são uma mais-valia quando não existe uma relação direta do produto em “stock” com o produto a processar, e desta forma existe uma versatilidade para se poder operar sistemas independentes de ambos os lados da tubagem de transporte [3].

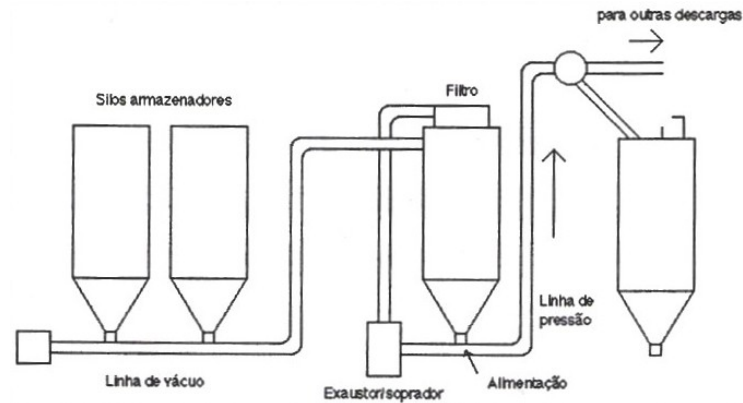


Figura 12 – Sistema se pressão positiva e negativa [3].

2.3. Partículas transportadas: classificação, atrito, velocidade, perda de carga e distribuição

2.3.1. Classificação de partículas finas de GELDART

Os diversos intervalos de granulometria dos pós e as suas características físicas influenciam regime de transporte. Uma metodologia para a separação das partículas em diversos grupos, e apresenta na Tabela 3.

Grupo	Características
A	Materiais com Tamanho médio das partículas pequeno ou baixa densidade $1,4 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Podem ser transportados em fase densa com pouca possibilidade de obstrução da tubagem, como por exemplo o cimento.
B	Partículas de tamanho de $40 < d_p < 500 \text{ [}\mu\text{m]}$ e densidade $1,4 < \rho_p < 4 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Pós que podem ter uma relação de massa de sólido transportado - X - $\text{[Kg sólidos/Kg ar]}$ até 100 vezes.
C	Pós de natureza coesiva de diâmetros muito pequenos, que tendem a aglomerarem em sistemas de transporte convencionais, ocasionando obstruções na tubagem. Nestes sistemas são muito utilizados tubos flexíveis para impedir tal fenómeno físico.
D	Sólidos de grandes diâmetros. Transportados com altas velocidades de ar e uma baixa relação de massa de sólido transportado - X - $\text{[Kg sólidos/Kg ar]}$.

Tabela 3 – Separação de partículas por GELDART (1973) [10].

A Figura 13 com as regiões dos grupos de A até D é denominada de Diagrama de GELDART. Nas abscissas encontra-se a granulometria e nas ordenadas a densidade dos diferentes pós.

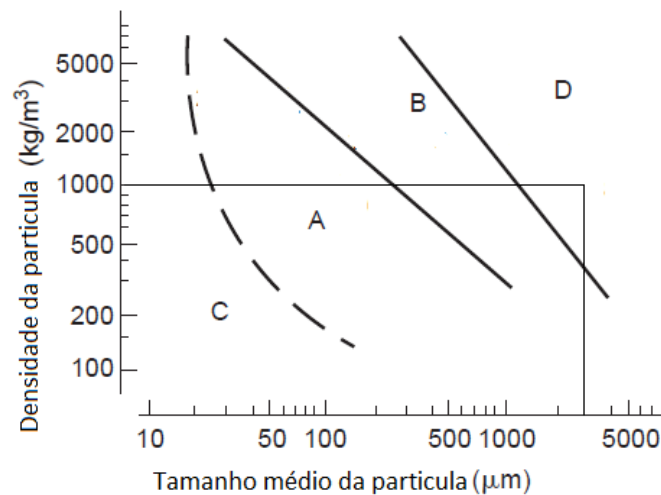


Figura 13 – Diagrama de GELDART (1973) [10]. Sendo ρ_p a densidade das partículas e d_m o diâmetro medio das partículas.

2.3.2. Influência do atrito de partículas

SALMAN, VERBA e HOUNSLOW (2002) [11], verificaram que a quebra de partículas em muitos sistemas de transporte pneumático pode representar um dos maiores problemas para produtos granulados. Em alguns casos, devido ao transporte, a distribuição do tamanho e aparência das partículas podem mudar significativamente as especificações requeridas do produto. Produtos finos podem geralmente causar problemas de sujidade quando manipulados. Em casos extremos é possível que a fragmentação de um produto seja tão severa a ponto de mudar as características dos fluxos. Isto pode também levar a subsequentes problemas de manipulação, particularmente no armazenamento.

Os estudos da degradação de partículas baseiam-se na circulação destas em sistemas de transporte pneumático. A mudança do tamanho da partícula antes e depois do transporte está geralmente relacionada com a velocidade do ar e o número de recirculações no circuito de tubagem. Este estudo tem fornecido informações gerais a respeito da

minimização da degradação de partículas durante o transporte. Porém, há muitas variáveis envolvidas neste mecanismo. Os resultados são válidos apenas para o sistema em estudo.

SALMAN, VERBA e HOUNSLOW (2002) [11], examinaram também as características da degradação das partículas, o efeito da velocidade da partícula, o ângulo de impacto, o tamanho da partícula e o número de impactos. Eles também desenvolveram um modelo matemático para prever a trajetória da partícula num tubo horizontal e a probabilidade de as partículas não sofrerem degradação durante o transporte pneumático em fase diluída. A validação deste modelo mostrou uma excelente conformidade com a simulação e os resultados experimentais obtidos em escala piloto.

GHADIRI *et al* (2003) [12] analisaram a partir de testes de impactos dois tipos de aglomerados produzidos por diferentes processos, mas com o mesmo método. Os efeitos da velocidade de impacto, tamanho do aglomerado, ângulo de impacto, fadiga, humidade e temperatura também foram alvo do seu estudo. Eles concluíram que ambas amostras mostram uma extensa deformação plástica devido ao alongamento e rutura da interface da partícula, especialmente para amostras húmidas. A redução da temperatura aumentou substancialmente a quebra das partículas. As amostras mantidas a -20°C tiveram a maior percentagem de rutura quando comparados com os efeitos de ângulo de impacto e exposição a humidade.

O atrito de partículas ou materiais granulares durante o transporte pneumático em fase diluída tem sido um problema de preocupação industrial. KONAMI, TANAKA e MATSUMOTO (2002) [13] investigaram os atritos dos granulados durante o repetido transporte pneumático. Eles apresentaram uma equação que demonstra a correlação entre a taxa de partículas finas e o diâmetro de grânulos grossos. Os resultados demonstraram que o atrito dos grânulos durante o repetido transporte pneumático foi alto ao início, mas a taxa de atrito diminuiu gradualmente e a forma dos grânulos permaneceu constante. O caudal de partículas finas aumentou proporcionalmente com diâmetros do grânulo.

2.3.3. Velocidade para o transporte em fase diluída

JONES (1988) [14] afirma que a seleção correta da velocidade de gás é um fator crítico e determinante num projeto de transporte pneumático. A velocidade do gás muito baixa pode ocasionar obstruções da tubagem e a velocidade muito alta pode aumentar a perda de carga, o desgaste na linha, principalmente em curvas, e reduzir o caudal massico de material a ser transportado.

A determinação da velocidade mínima de transporte depende das propriedades físicas do material. É difícil determinar com precisão esta velocidade visto que a área transversal da tubagem depende da área ocupada pelas partículas num dado instante. A velocidade superficial do gás, V_g , é baseada na área da secção transversal da tubagem vazia A , mas obtida utilizando, por exemplo, um Tubo de Pitot para a mistura gás/sólido, conforme a Equação 1.

$$V_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{W_g}{A \times \rho_g} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

A velocidade de um transporte não pode ser excessiva, por razões de consumo de potência, diminuição do desgaste abrasivo das tubagens (especialmente em cotovelos) e para alguns casos, de forma a diminuir a deterioração das partículas causada por impactos.

O tamanho, densidade e forma das partículas, e talvez outros fatores menos óbvios influenciam na velocidade mínima segura de transporte.

RIBEIRO (2005) [15] cita que no transporte pneumático é possível distinguir a velocidade das partículas e a do gás e que testes mostraram que a velocidade de escoamento entre as duas fases pode ser importante e sua influencia não é desprezável. Afirma que a velocidade de escoamento é função de um grande número de fatores e, em particular, das dimensões das partículas. Só no caso de partículas muito pequenas, e quando as concentrações de massa e volumétricas são extremamente baixas, se pode admitir que a velocidade do gás é igual a velocidade das partículas. Cita também que na distribuição de

partículas que ainda não é homogênea em certas secções da tubagem, as velocidades dessas partículas não são iguais, mas, na prática, não é necessário conhecer os movimentos das partículas individualmente, porque só a granulometria média é importante. Para facilitar a escolha do sistema de funcionamento do transporte pneumático, é necessário especificar a velocidade de base do gás em escoamento monofásico, a velocidade média do gás para uma determinada secção do tubo e a velocidade média das partículas para uma determinada secção do tubo.

GOMIDE (1983) [16] cita algumas correlações aproximadas para determinação da velocidade de transporte em função da densidade aparente. Recomenda a correlação de Flotronics como estimativa:

$$V_t = 37\sqrt{\rho_p} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \left(0,15 \leq \rho_p \leq 2 \frac{t}{m^3} \right) \quad (2)$$

A Tabela 4 mostra as velocidades indicadas por GOMIDE (1983) [16] para alguns materiais.

Material	$V_t[m/s]$	Material	$V_t[m/s]$
Algodão	22,9	Cortiça	15,2
Areia	35,6	Lã	20,3
Areia de jacto	20,3	Papel	25,4
Borracha em pó	22,9	Poeiras metálicas	9,1
Café em grãos	17,8	Pó de chumbo	22,4
Calcário Moído	25,4	Pó de fundição	22,9
Carvão fina	20,3	Aparas metálicas	25,4
Cereais em grão	28,4	Serragem seca	15,2
Cimento	35,6	Trigo	29,5

Tabela 4 – Velocidades de alguns materiais (GOMIDE, 1983) [16].

As equações 3 e 4 usadas por GOMIDE apud DALLA VALLE (1963) [16] consideram a ρ_p - Densidade das partículas e o d_p - Diâmetro da partícula (variando entre 1 e 5 mm). As

velocidades obtidas com estas expressões são bem inferiores as fornecidas pela correlação anterior e as da Tabela 4, isto pelo pequeno tamanho das partículas utilizadas.

$$V_h = 8,45 \times \frac{\rho_p}{\rho_p + 1} \times d_p^{0,4} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3)$$

$$V_v = 1,07 \times d_p^{0,2} \times V_h \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

A velocidade de transporte ainda pode ser calculada usando a expressão adaptada por GOMIDE (1983) do *Fan Engineering* [16]:

$$V = (V_f) \times (V_t) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5)$$

$$V = \left(4,11 \times \sqrt[3]{\rho_p} \times \sqrt{d_p} \right) + \left(23,4 \times \sqrt{\rho_p} \right) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

Em que:

- V_f - Velocidade de flutuação do fluido em condutas verticais e horizontais [m/s];
- V_t - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s];
- ρ_p - Densidade das partículas [t/m³];
- d_p - Diâmetro das partículas [mm].

2.3.4. Velocidade de afogamento no transporte vertical

MOLODTSOF e MOTTE (2001) [17] definem como velocidade de gás mínima de transporte pneumático vertical, aquela que é necessária para transportar em fase diluída, os sólidos em suspensão. A velocidade de afogamento é utilizada para marcar o limite entre a fase diluída e a fase densa em tubos verticais, apesar de não ser uma definição muito clara.

É comum e prático relacionar a velocidade do gás com a perda de carga para o transporte pneumático de um dado tipo de sólido. Conforme RHODES (2004) [18], a perda de carga total por comprimento de linha de transporte tem em geral, seis componentes:

- a) Perda de carga devido a aceleração do gás;
- b) Perda de carga devido a aceleração da partícula;
- c) Perda de carga devido a fricção do gás no tubo;
- d) Perda de carga relacionada a fricção dos sólidos com a tubagem;
- e) Perda de carga devido a carga estática dos sólidos;
- f) Perda de carga devido a carga estática do gás.

A *Figura 14* apresenta o diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, relacionando o gradiente de pressão por unidade de comprimento ($\Delta P / \Delta L$) e a velocidade do gás.

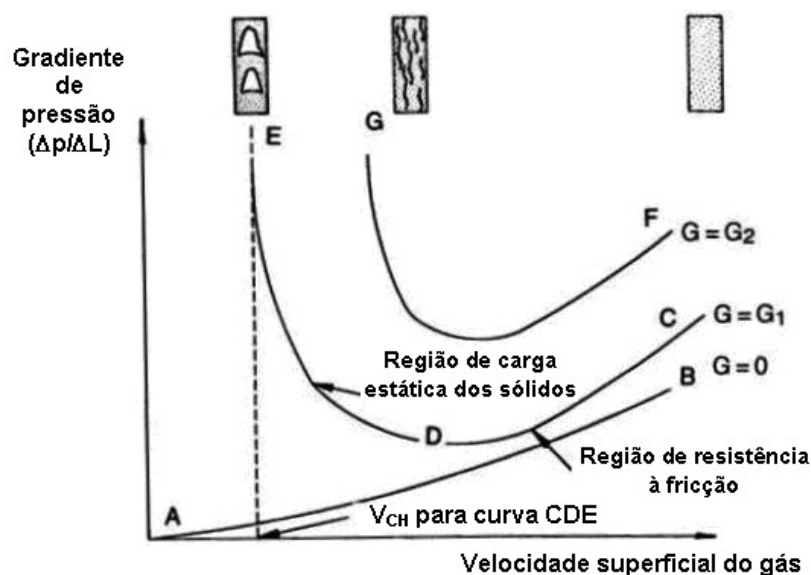


Figura 14 – Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás. V_{CH} e a velocidade de afogamento "shocking" (Rhodes, 2004) [18].

A curva **AB** representa a perda de pressão por atrito devida ao escoamento do gás no transporte vertical com um caudal mássico nulo.

A curva **CDE** é para um fluxo de sólidos com um caudal massico, G_1 .

A curva **FG** é para um caudal massico mais alto, G_2 .

No ponto **C** a velocidade do gás é alta, a concentração é baixa e a resistência do atrito entre o gás e a parede do tubo é predominante. A medida que a velocidade do gás é reduzida, a resistência do atrito diminui, mas como a concentração da suspensão aumenta, a carga estática exigida para suportar estes sólidos aumenta. Se a velocidade do gás é reduzida a um valor abaixo do ponto **D**, então o aumento na carga estática excede em valor a diminuição na resistência por atrito, e $\Delta P/\Delta L$ sobe novamente.

Na região **DE** a velocidade decrescente causa um aumento rápido na concentração de sólidos e é alcançado um ponto em que o gás não pode mais arrastar todos os sólidos. Neste ponto, forma-se na linha de transporte um leito fluidizado deslizante ("slugging"). O fenômeno de "afogamento" é normalmente acompanhado por grandes flutuações de pressão.

A velocidade de afogamento, V_{ch} é definida como a velocidade mais baixa na qual essa linha de transporte pode operar em fase diluída com o caudal massico de alimentação de sólidos G1. Com um caudal massico de alimentação de sólidos mais alta, G2, a velocidade de afogamento é mais alta. Esta velocidade marca o limite entre transporte pneumático vertical de fase diluída e o transporte de fase densa. É de notar que o afogamento pode ser alcançado diminuindo a velocidade do gás com um caudal massico de sólidos constante, ou aumentando o caudal de sólidos com uma velocidade do gás constante.

2.3.5. Velocidade de saltitação no transporte horizontal

No transporte horizontal SCHIAVON (2000) [19] considera a determinação da velocidade de saltitação um fator importante para o projeto do transporte pneumático, pois indica a mínima velocidade do gás para que as partículas sejam transportadas com a máxima economia de energia e sem causar o entupimento da tubagem. No entanto, a cálculo dessa velocidade é muito complexa devido aos diferentes mecanismos que ocorrem no escoamento, dependentes da relação entre o tamanho da partícula e a espessura da camada limite e os efeitos da variação da concentração de particulados na linha de transporte.

ZENZ (1949) [20] apresenta quatro definições para a velocidade de saltitação para uma única partícula em transportador horizontal:

- a) A velocidade mínima do gás necessária para transportar uma única partícula sobre a parte inferior do tubo através do deslizamento, rolagem e saltitação;
- b) A velocidade mínima necessária para retirar uma partícula do repouso e movimentá-la em suspensão;
- c) A velocidade mínima para transportar uma partícula alimentada na linha de transporte sem rolar, saltar ou ter uma trajetória oscilante;
- d) A velocidade mínima necessária para tirar uma partícula de repouso de uma camada e transportá-la em suspensão.

Estas definições são válidas para concentrações de sólidos, nula. Os ensaios realizados por ZENZ (1949) [20] mostraram que a velocidade dada pela definição d) pode ser de 2,0 a 2,5 vezes maior que a velocidade obtida pela definição a). Portanto, nota-se uma discrepância muito grande da literatura existente e a dificuldade de sua normalização. SCHIAVON (2000) [19] comenta que o fator mais importante no cálculo da velocidade de saltitação é o perfil de velocidades do gás próximo da parede, na seção onde se verifica o salto. Este perfil de velocidade é de difícil medição devido a grande influência das partículas sobre o mesmo.

SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21] relatam que os dois parâmetros que caracterizam o transporte pneumático de materiais sólidos em tubagens horizontais são as velocidades de saltitação e arraste. A primeira pode ser definida como a mínima velocidade do gás onde as partículas se começam a sedimentar no fundo do tubo. Eles definem a velocidade de arraste como a velocidade do gás requerida para tornar a suspender as partículas inicialmente em repouso na parte inferior da tubagem horizontal. As suas relações também estão descritas qualitativamente por KLINZING e CABREJOS (1994) [22] apud SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21]. Eles apresentaram correlações de fatores tais como, o tamanho da partícula (maiores que 100 μm), a densidade do gás, e a viscosidade do gás com a velocidade de arraste. KLINZING e CABREJOS (1991) [22] concluíram que a **velocidade de arraste é proporcional a raiz quadrada do diâmetro da partícula e a densidade da partícula**

a três quartos (75%) do consumo de energia. Afirmou também que a **velocidade de arraste é inversamente proporcional a raiz quadrada da densidade do gás e não é influenciada pela viscosidade do gás.**

CURTIS, KIMBERLY e PARK (2003) [23] investigaram a correlação entre as características das partículas e a velocidade de arraste utilizando partículas menores de 35 µm de diâmetro. Citam que existe uma forte correlação entre o tamanho da partícula e a força dominante a qual determina a importância da velocidade de aceleração. O estudo dos efeitos do tamanho das partículas mostrou a existência de uma velocidade mínima de arraste. Acima deste mínimo, efeitos inertes requerem velocidades altas para o arraste de partículas grandes. Abaixo deste mínimo, as interações partícula/partícula tornam-se mais significantes e maiores velocidades são necessárias para separar as partículas.

A Figura 15 mostra os diferentes tipos de regime de escoamento e a diferença entre a velocidade de saltitação e arraste de partículas solidas. Este gráfico relaciona o número de Froude Fr_p com o número de Reynolds das partículas Re_p :

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \times d_p}} \quad (7)$$

$$Re_p = \frac{V_g \times d_p \times \rho_p}{\mu_g} \quad (8)$$

Sendo:

- V_t - Velocidade de transporte dos sólidos;
- V_g - Velocidade do gás;
- d_p - Diâmetro da partícula;
- ρ_p - Densidade da partícula;
- μ_g - Viscosidade do gás;
- g - Aceleração da gravidade.

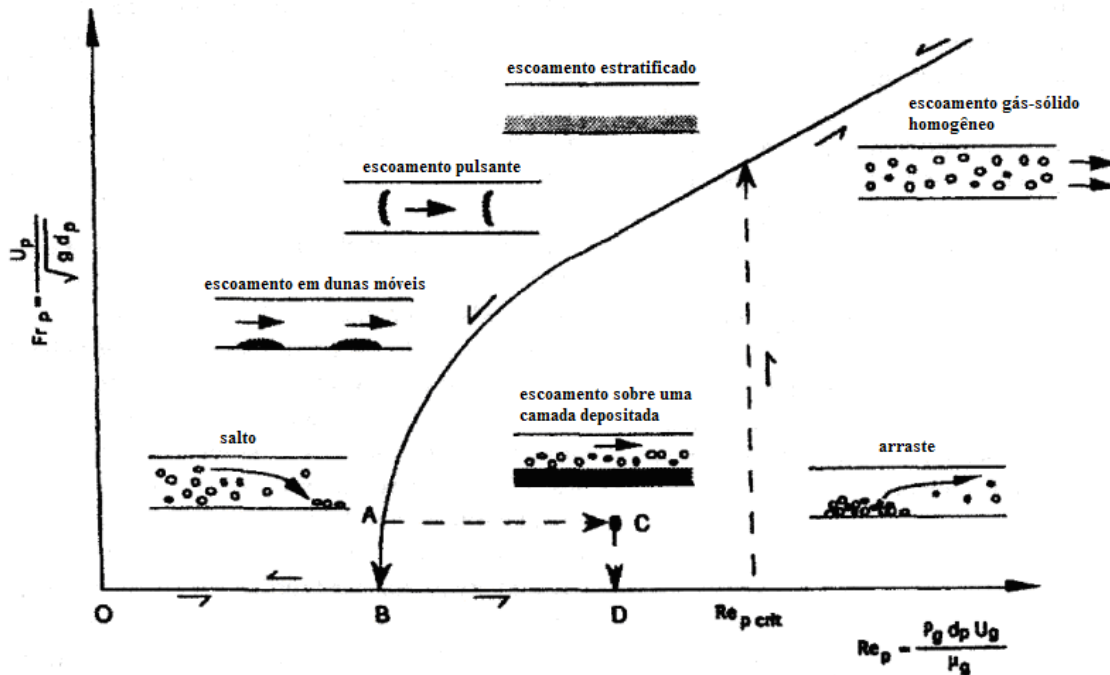


Figura 15 – Modelo conceitual de diferentes regimes de escoamento em sistemas de dutos horizontais, conforme SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21].

As partículas inicialmente formam uma camada suportada ou depositada no fundo da tubagem com velocidade de gás nula (ponto O). Observa-se na Figura 15 que os pontos podem ser alcançados pelo aumento da velocidade média do gás onde as partículas do topo da camada se reorientam e movimentam-se lentamente sem serem arrastadas pelo fluxo de gás. Como o aumento da velocidade média do gás o estado de repouso das partículas torna-se instável e algumas partículas começam a ser arrastadas e separadas da superfície da camada. Se a velocidade do gás aumentar, um ponto seguinte é atingido na qual parte das partículas separam-se da superfície e a camada sofre erosão. Estes fenômenos de arraste iniciam-se quando o número de Reynolds das partículas atinge um valor crítico, $Re_{p\ crit}$. Depois as partículas são suspensas e transportadas numa suspensão gás-sólido homogênea com uma dada velocidade de partículas. Além disso, um aumento posterior na velocidade média do gás aumentará a velocidade das partículas e o número de Froude das mesmas.

A velocidade de saltitação diferencia-se da velocidade de arraste em relação à posição inicial das partículas. Uma mudança no padrão de escoamento pode ser observada quando a velocidade média dos gases de uma suspensão homogênea gás-sólido decresce lentamente. Nota-se que abaixo do número de Reynolds crítico da partícula, instabilidades

devido a uma baixa velocidade média do gás afetam o comportamento das partículas sendo transportadas em suspensão dentro da tubagem diferentes regimes de escoamento podem-se desenvolver antes da saltitação, por exemplo, escoamento estratificado, pulsante e dunas moveis.

Se a velocidade média do gás decresce ainda mais, um ponto é alcançado no qual as partículas saem da suspensão e depositam-se no fundo da conduta (ponto A), denominada de saltitação. Esta condição ocorre sempre abaixo do número de Reynolds crítico para o arraste. Dois fenómenos diferentes podem ser vistos neste ponto: algumas partículas permanecem em repouso no fundo da conduta formando dunas enquanto outras continuam-se escoando, deslizando e saltando sobre estas dunas fixas, causando um arraste da partícula até que uma condição de equilíbrio seja alcançada, na qual as partículas são transportadas sobre o topo da camada depositada. Entretanto, a velocidade média do gás aumenta devido a redução da área transversal livre, e um transporte permanente é restabelecido no topo da camada depositada (linha A-C). O número de Reynolds da partícula no sistema de transporte denso está cerca de 20% abaixo do valor crítico, confirmando que a presença de sólidos na corrente causa a fácil remoção da camada depositada. A sequência dos padrões de fluxo do gás-sólido pode ser observada para velocidade do gás média abaixo da velocidade de saltitação: dunas em movimento, depositadas e camada depositada. Conforme a velocidade média do gás continua a diminuir, torna-se impossível um escoamento gás-sólido e as partículas passam a acumular-se na conduta aumentando o risco de entupimento.

Na linha A-C da Figura 15 ocorre o transporte pneumático com regime de escoamento “pistonado” para partículas de tamanho grande, já que para partículas de tamanho pequeno é mais provável que ocorra o bloqueio da conduta. Assim, o transporte pneumático tem interesse na prática industrial devido a diversas características, tais como:

Baixo consumo de energia, razão alta de fluxo massico de sólidos e baixa fricção das partículas na conduta. Entretanto, o risco de entupimento do tubo pode ser desprezado somente para partículas grandes com formato uniforme e de superfície lisa e o regime de operação também requer medidas adicionais, tal como descrito MOLERUS [24] apud

SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21], incluindo uma vibração axial onde o intervalo de tempo entre os ciclos de vibração é escolhido de forma a propulsionar as partículas sólidas dentro da tubulação. SCHIAVON (2000) [19] diz que o transporte de alguns materiais sólidos granulares em modo de escoamento não suspenso e a baixa velocidade tem muitos benefícios na operação de sistemas de transporte pneumático. Infelizmente, muitos materiais sólidos granulares não podem ser transportados em escoamento não suspenso. Isto tem levado ao desenvolvimento de um número de sistemas especificamente projetados para superar esta limitação. BARTON apud SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) [21] apresentam uma investigação sobre o uso de tubagens de ar de derivação com o meio de transporte de materiais, que poderiam de outro modo requerer uma alta velocidade em um modo de escoamento não suspenso.

Segundo RHODES (2004) [18] a relação geral entre a velocidade do gás e o gradiente de pressão por comprimento ($\Delta P/\Delta L$) para uma linha de transporte horizontal pode ser vista na Figura 16.

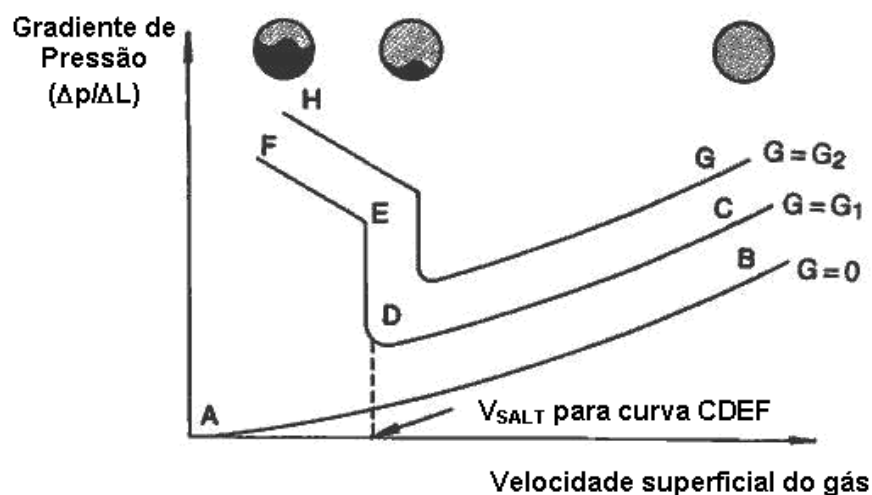


Figura 16 - Diagrama de fase para transporte pneumático horizontal de fase diluída (RHODES, 2004) [18].

A linha **AB** representa a curva obtida para gás escoado sem sólidos na tubagem, **CDEF** representa o fluxo de sólidos, G_1 , e a curva **GH** o fluxo com um maior caudal massico de alimentação de sólidos, G_2 .

No ponto **C**, a velocidade do gás é suficientemente alta para conduzir todos os sólidos numa suspensão muito diluída. As partículas sólidas são impedidas de sedimentar nas paredes do tubo pelas turbulências geradas no fluxo gás. Se a velocidade do gás é reduzida, enquanto a taxa de alimentação de sólidos é mantida constante, a resistência de atrito e $\Delta P/\Delta L$ decrescem. Os sólidos movem-se mais lentamente e a concentração de sólidos aumenta. No ponto **D** a velocidade de gás é insuficiente para manter os sólidos em suspensão e os sólidos começam a sedimentar no fundo do tubo. A velocidade de gás a qual isto acontece é chamada de velocidade de saltitação. Uma posterior diminuição na velocidade do gás resulta numa rápida deposição de sólidos e rápido aumento em $\Delta P/\Delta L$ á medida que a área disponível para fluxo de gás é restringida pela sedimentação de sólidos. Na região **E** e **F** alguns sólidos podem mover-se em fluxo de fase densa, ao longo do fundo do tubo, enquanto outros seguem em fluxo de fase diluída no gás, na parte superior do tubo. A velocidade de pulsação marca o limite entre fluxo de fase diluída e fluxo de fase densa no transporte pneumático horizontal.

Não é possível prever teoricamente as condições nas quais ocorrerá escoamento em fase densa (saltitação). Porém, muitas correlações obtidas a partir de dados experimentais para prever a velocidade de saltitação estão disponíveis na literatura. A correlação de ZENZ (1964) que é frequentemente usada requer o uso de um gráfico. LEUNG e JONES (1978)[26] afirmam que ela tem um erro medio de 54%. A correlação de RIZK (1973) [27], baseada numa aproximação semi-empírica, e consideravelmente mais simples, mas apresenta uma margem de erro semelhante. É representada por:

$$V_{gs} = \left[\frac{W_s \times 10^\delta}{A \times \rho_g} \times (\sqrt{g \times d})^x \right]^{\frac{1}{x+1}} \quad (9)$$

$$\delta = 1,44 \times d_p + 1,96 \quad (10)$$

$$x = 1,1 \times d_p + 2,5 \quad (11)$$

Sendo:

- V_{gs} - Velocidade de saltitação [m/s];
- W_s - Caudal massico de sólidos [kg/s];
- A - Área [m²];
- ρ_g - Densidade do gás [kg/m³];
- d - Diâmetro interno da tubagem [m];
- g - Aceleração da gravidade [m/s²];
- d_p - Diâmetro da partícula [μm].

MATSUMOTO (1975) [28] fornece a correlação para $d_p \geq d_p^*$

$$\frac{d_p^*}{d} = 1,39 \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{-0,74} \quad (12)$$

$$\frac{W_s}{W_g} = 0,373 \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1,06} \times \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{-3,7} \times \left(\frac{Fr_s}{10} \right)^{3,61} \quad (13)$$

$$Fr_s = \frac{V_{gs}}{\sqrt{g \times d}} \quad (14)$$

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \times d_p}} \quad (15)$$

$$V_t = 1,73 \times \frac{\sqrt{g \times d_p \times (\rho_p - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (16)$$

Rearranjando a equação temos:

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{-1,06} \times \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{3,7} \times \frac{W_s \times 10^{3,61} \times (\sqrt{d \times g})^{3,61}}{(0,373) \times (A \times \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3,61+1}} \quad (17)$$

- V_{gs} - Velocidade de saltitação [m/s];
- Fr_p - Número de Froude das partículas;
- V_t - Velocidade das partículas [m/s];
- d_p - Diâmetro das partículas [m];
- d_p^* - Diâmetro crítico [m];
- ρ_f - Densidade do fluido [kg/m³];
- ρ_p - Densidade das partículas [kg/m³];
- d - Diâmetro da tubagem [m];
- A - Área [m²];
- g - Aceleração da gravidade [m/s²].

2.3.6. Cálculo da perda de carga

O cálculo da perda de carga de um sistema pneumático, pode ser determinada por diversas equações empíricas apresentadas na literatura. GOMIDE (1983) [16] sugere o cálculo da perda de carga por atrito para linhas horizontais, por unidade de comprimento ($\Delta P / L$), para escoamento de ar num duto de diâmetro e velocidade conhecidas, através da equação empírica 18:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,68 \times (X + 3,5) \times \frac{V_t^{1,8}}{d^{1,22}} \text{ [mm/m]} \quad (18)$$

O valor de X pode ser obtido pela expressão:

$$X = \frac{C}{4,29 \times Q_g} \quad (19)$$

Em que:

- V_t - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s];
- d - Diâmetro interno da tubagem [mm];
- X - Relação de massa de solido transportado [kg sólidos/kg ar];
- C - Capacidade do sistema [t/h];
- Q_g - Caudal volúmico de gás de transporte [m³/s].

A perda de carga por aceleração do material nos troços horizontais deverá ser usada sempre que a alimentação seja feita após o ventilador e pode ser representada pela expressão:

$$\Delta P_a = 2,25 \times X \times P_a \quad (19)$$

$$P_a = \left(\frac{V}{4,043} \right)^2 \text{ [mm. c. a]} \quad (20)$$

Uma vez que esta perda não existe se o sólido for alimentado após o ventilador, convém multiplicar este valor por um fator de redução φ , que sera igual a 1,0, se o sólido for alimentado depois do ventilador, é menor que 1,0, se o material passar pelo ventilador.

Como regra prática utiliza-se $\varphi = 0,5$ se o ponto de alimentação estiver localizado a montante da boca de aspiração.

A perda de carga total é a soma de todas as perdas de carga por atrito, por aceleração e nos demais equipamentos dos sistemas, como silos, ciclones, filtros e outros. A equação 21 representa esta perda de carga:

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times L_t \times (X + 3,5) \times \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \times \varphi \times X \times V^2 + \Delta P_e \right] \times 10^{-4} \text{ [Kg/cm}^2\text{]} \quad (21)$$

Sendo:

- L_t - Comprimento total [m];
- V_t - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s];
- d - Diâmetro interno da tubagem [mm];
- X - Relação de massa de sólido transportado [kg sólidos / kg ar];
- φ - Fator de redução;
- ΔP_e - Perda de carga dos equipamentos [mm].

Conforme JONES (1988) [14], a queda de pressão total de um sistema está relacionada com a resistência só ar na linha de fornecimento deste fluido (ΔP), queda de pressão na linha de transporte ΔP_{conv} , e a queda de pressão através de sistemas de separação gás-sólidos ΔP_{sep} . A Figura 17 ilustra a perda de carga dos elementos para um sistema de pressão positiva.

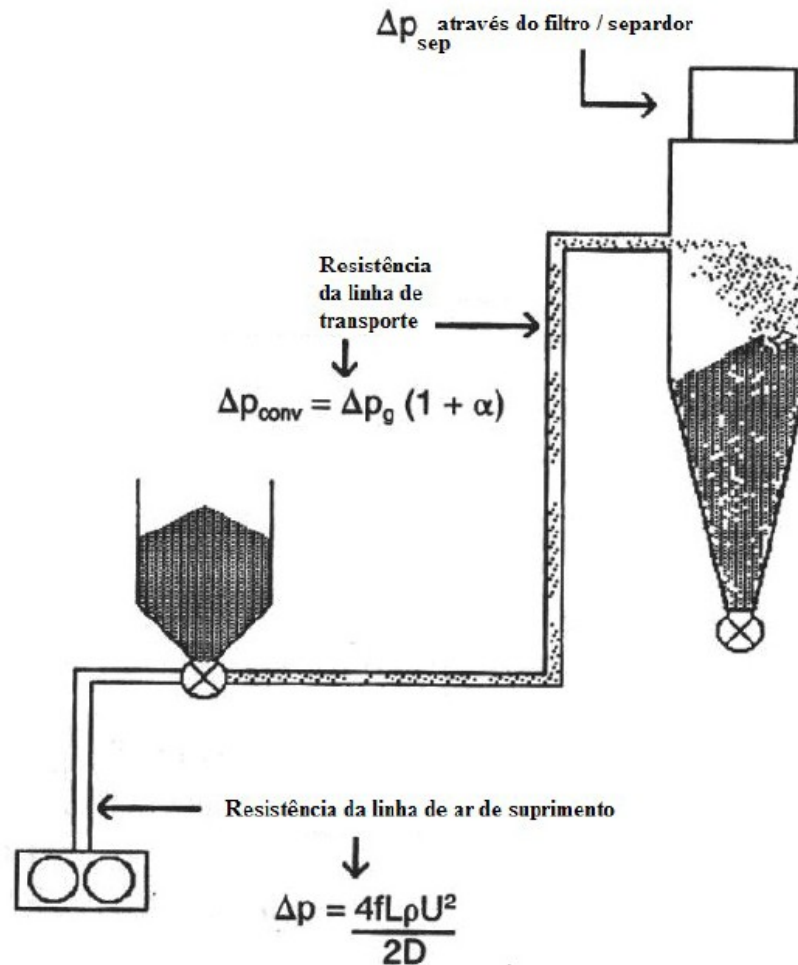


Figura 17 – Elementos de queda de pressão para sistema de pressão positiva (JONES, 1988) [14].

As perdas de cargas do ar de alimentação e da linha de transporte podem ser calculadas a partir das equações 22 e 23 respetivamente:

$$\Delta p = \frac{4 \times f \times L \times \rho_g \times V_g^2}{2d} \quad (22)$$

$$\Delta p_{conv} = \Delta p_g \times (1 + \alpha) \quad (23)$$

Sendo:

- f - Fator de fricção [adimensional];
- L - Comprimento da linha [m];

- ρ_g - Densidade do gás [kg/m^3];
- V_g - Velocidade do gás [m/s];
- d - Diâmetro interno da tubagem [m];
- Δp_g - Perda de carga do gás [Pa];
- α - Fração volumétrica de sólidos [adimensional].

A Perda de carga na linha de transporte é o parâmetro mais crítico de ser determinado. Na prática, o método mais comum baseia-se em experiências anteriores de manipulação de mesmo material ou por meio de testes em escalas pilotos para obtenção de relações entre as principais variáveis do sistema pneumático, o caudal massico de ar e de sólidos e perda de carga na linha de transporte.

Atualmente, os testes pilotos dos materiais foram considerados os métodos mais confiáveis nas determinações destas relações. Estes testes podem ser realizados para diversas condições incluindo ambos tipos de transporte em fase densa e diluída. No entanto, não existe modelos aceitáveis para transporte em fase diluída.

No transporte horizontal e vertical de fase diluída a operação com velocidade baixa minimiza a perda de pressão por atrito, porem gera maior desgaste na parte inferior da tubagem.

No transporte de fase diluída o atrito do gás na parede é assumida como independente da presença dos sólidos e assim o fator de fricção para o gás pode ser usado o fator de atrito de *Fanning*.

Foram apresentadas várias aproximações na literatura para calcular o atrito do solido na parede. A correlação de KONNO e SAITO (1969) [29] é utilizada para calcular a perda de pressão devido ao atrito do solido no tubo em transporte vertical e a correlação de HINKLE (1953) para calcular esta perda de pressão no transporte horizontal. HINKLE (1953) [30] assume que as partículas perdem impulso por colisão com as paredes do tubo. A perda de

pressão devido a fricção solido-parede e a perda de pressão do gás como resultado da aceleração dos sólidos. RIBEIRO (2005) [15] cita que quando as dimensões das partículas são pequenas em relação ao diâmetro do tubo, e se as concentrações volumétricas e de massa são muito baixas, pode-se admitir uma concentração espacial média dentro de uma determinada secção da tubulação uniforme, sendo possível assimilar que a suspensão fluida é homogénea. Porém, em práticas industriais, esse método não é muito utilizado, tendo em vista que, mesmo em fase diluída, as partículas não são distribuídas uniformemente na secção da tubagem.

Quando concentrações volumétricas e de massa não são desprezáveis e quando as dimensões das partículas não são reduzidas em relação ao diâmetro da tubagem, as trajetórias destas partículas serão diferentes das do gás, especialmente nas zonas de introdução do produto na tubagem de transporte. Essa zona onde acontece a colocação das partículas em velocidade é um ponto de uma perda de pressão bastante elevada. A perda de carga nesta região, como também a jusante do alimentador de partículas, é distintamente superior quando em regime já estabelecido a perda de carga em regiões onde o gradiente de pressão é quase constante.

SOMMERFELD e KUSSIN (2004) [31] realizaram uma análise experimental do comportamento de partículas de vidros num canal de fluxo horizontal. Os resultados demonstraram a influência do tamanho da partícula, do grau de rugosidade das paredes sobre as concentrações de partículas, os perfis de velocidade e a perda de pressão.

2.4.5. Resumo da revisão bibliográfica

Foram apresentados neste capítulo os principais fundamentos e equipamentos, as principais vantagens e desvantagens, a classificação e os regimes de escoamento do transporte pneumático de partículas. Descreveram-se também as principais variáveis de transporte pneumático, as características e parâmetros com relação às partículas, como a classificação, velocidade, perda de carga e distribuição na secção transversal dos tubos.

3. Principais componentes do transporte pneumático

Um sistema Pneumático de transporte de sólidos não ficaria completo se não fossem abordadas as características dos principais componentes dos sistemas de transporte pneumático, focando o funcionamento dos diversos equipamento que integram o sistema. Neste capítulo apenas serão abordados os componentes que serão alvo de avaliação de cálculo para o transporte pneumático em fase diluída, onde de facto o circuito de transporte, ciclone e bomba de vácuo/pressão são os componentes principais.

3.1. Ciclone

O princípio de funcionamento do ciclone é baseado na separação de sólidos do fluxo de gás por meio de efeito centrífugo (Figura 18). O produto transportado pelo sistema que será constituído de ar e materiais granulados, ao entrar no coletor será forçado a realizar um movimento em espiral, surgindo assim o aparecimento de forças centrífugas atuando sobre as partículas em suspensão no gás, forçando-as contra a parede do corpo do ciclone. A desaceleração ocorrida devido a aproximação destas partículas da parede do ciclone provoca a sua queda do produto para a base do ciclone, podendo assim ser coletadas.

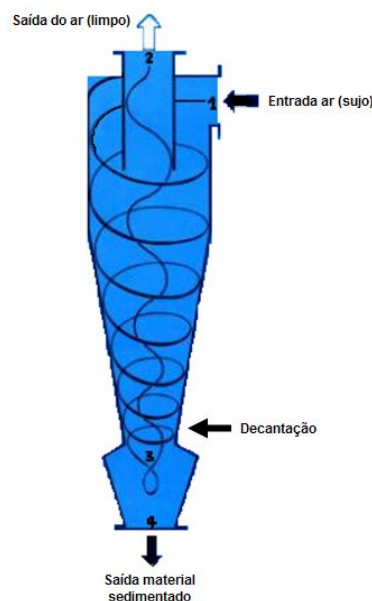


Figura 18 – Filtro ciclone [4].

3.2. Sopradores

Para o transporte horizontal e vertical em fase diluída é necessário operar a baixas velocidades de modo a minimizar a perda de pressão do escoamento, reduzir o atrito e os custos decorrentes deste efeito.

O soprador pode fornecer ao sistema grandes caudais de ar. Um adequado dimensionamento do soprador evita a condição de entupimento da linha, nesta condição o sistema fica colmatado de sólidos e só pode ser reiniciado pela drenagem da linha. Os tópicos a seguir exemplificam os principais tipos de equipamentos que podem ser utilizados como sopradores promovendo o caudal de ar necessário ao processo.

3.2.1. Ventiladores centrífugos

Neste tipo de equipamento, o rotor aspira o ar e a extração é feita através do bocal de descarga, seguindo uma trajetória em espiral. O eixo de descarga é perpendicular ao eixo de aspiração. Como o fluxo de ar atravessa o ventilador, usa-se o rotor de palhetas inclinadas para trás que propicia um melhor rendimento. Se o ar estiver contaminado por poeiras, ou se o produto atravessar o ventilador, deve-se utilizar um rotor aberto com palhetas radiais. Nessa situação o rendimento do ventilador ficara entre 50 e 70% (Da SILVA, 2005) [5].

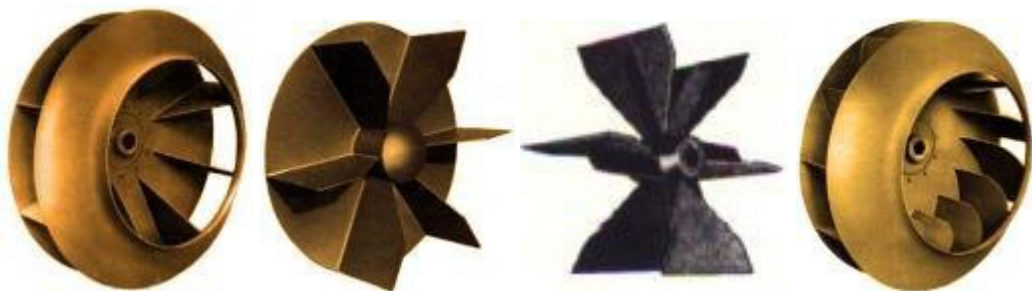


Figura 19 – Rotor radial fechado, Rotor Radial aberto com disco, Rotor radial aberto, Pás curvadas para trás [5].

3.2.1 Ventiladores Multiestágios

Com o intuito de se obter pressões mais elevadas do que as obtidas nos ventiladores centrífugos, podem-se usar ventiladores em serie ou ventiladores com rotor em multiestágios (Figura 20).



Figura 20 – Ventilador multiestágios [32].

Esses equipamentos são utilizados em instalações de descarga de navios ou em limpezas com alto vácuo. Porém, como o caudal varia com a carga instantânea, torna-se necessário equipar a instalação com um regulador para limitar variações de caudal de ar e por consequência a variação da potência absorvida.

3.2.3. Compressor de Palhetas

Este sistema é constituído por um estator cilíndrico que recebe um rotor excêntrico e ranhurado. Cada ranhura é provida de uma palheta deslizante que é forçada contra a parede do estator por molas ou pela força "centrífuga" causada pelo movimento de rotação do rotor. Na Figura 21 é ilustrado seu funcionamento.

Quando a palheta A passa pelo orifício de entrada de ar, a câmara a ser evacuada é colocada em contacto com o volume limitado pelo estator, e no selo superior, também no rotor e na própria palheta. Este volume de ar irá aumentar conforme ocorre o avanço da

palheta, isso produzira uma queda de pressão na câmara, queda esta que ira continuar ate que a palheta B avance até á entrada, quando então o ar existente neste volume é isolado entre as duas palhetas. Conforme a rotação continua, o ar existente passa a ser comprimido pela palheta B, ate que atinja pressão suficiente para abrir a válvula de saída sendo assim descarregado para a atmosfera. Como as palhetas atuam sequencialmente, com uma rotação, um volume de ar igual ao dobro do mostrado na Figura 21b será retirado da câmara. Os contactos das palhetas e do rotor com o estator podem formar três câmaras separadas (Figura 21d) que contem ar em diferentes pressões, e devem, portanto ser estanques.

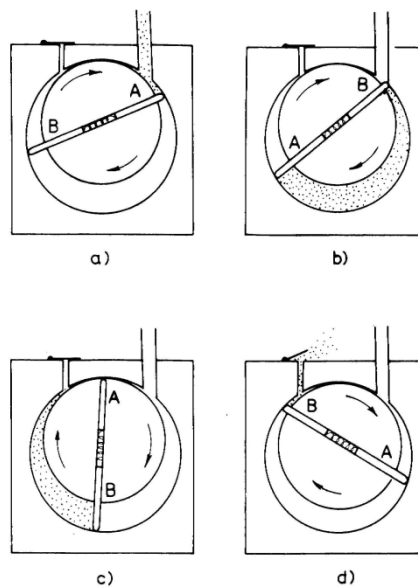


Figura 21 – Esquema de funcionamento de uma bomba de palhetas de um estágio [33].

3.2.4. Compressor de Lóbulos Rotativos

Este equipamento, que também é conhecido como compressor tipo *Roots*, tem ampla utilização no transporte pneumático, é constituído tipicamente de dois rotores simétricos em forma de “8” conjugados por engrenagens e girando em sentido inverso, movimento este sendo realizado no interior de um invólucro (Figura 22).

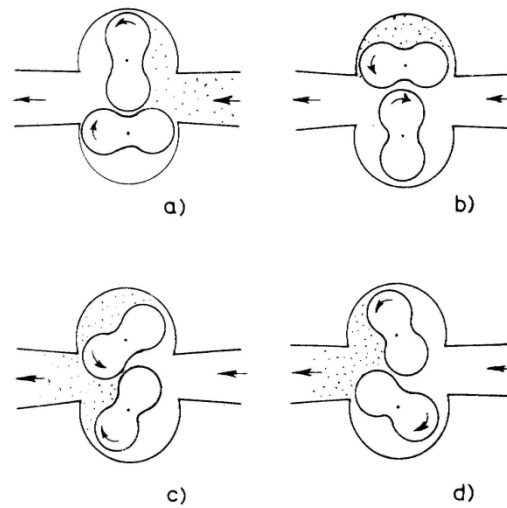


Figura 22 – Funcionamento de um compressor tipo Roots [33].

O funcionamento do compressor ocorre sem lubrificação dos lóbulos, nem arrefecimento do corpo. Desta forma, o ar está isento de óleo, entretanto é necessário considerar as folgas mínimas que existem entre os lóbulos e entre cada um deles e a carcaça.



Figura 23 – Compressor de Lóbulos Rotativos [34].

3.3. Circuito de Transporte

3.3.1. Condutas

Deve-se escolher o diâmetro da conduta para que seja possível, manter em todo o trajeto de transporte a velocidade necessária para deslocamento do produto. O circuito é feito com tubo em aço com costura de usos gerais. Quando a natureza do produto exige, deve-se usar tubulação em aço inoxidável ou em liga de alumínio. Se o produto não é abrasivo, para transportes em baixas concentrações, podem ser fabricados em chapas de aço carbono calandradas e soldadas. Em todos os casos, o circuito deve ser perfeitamente estanque e as secções diferentes de tubulação devem ser alinhadas perfeitamente para evitar todo e qualquer ressalto interno. O acoplamento entre elas deve ser conseguido por meio de flanges soldadas e aparafusadas, com uso de juntas de estanqueidade, juntas de dilatação ou outros acessórios desenvolvidos para esse fim.

3.3.2. Curvas ou mudanças de direção

A aplicação de curvas dificulta o desenvolvimento do projeto de sistemas de transporte pneumático de fase diluída, pois ela aumenta a queda de pressão no circuito, e também são pontos propícios a erosão, abrasão e atrito durante a passagem das partículas. A Figura 35 mostra o desgaste causado num tubo transportando pneumáticamente em fase diluída.



Figura 24 – Exemplo de desgaste de um tubo [5].

Partículas sólidas em suspensão, em tubos horizontais ou verticais retos, tendem a tocar a superfície das curvas devido a força centrífuga (Figura 25). Em virtude deste fator, a velocidade das partículas é reduzida e são, então, rearrastadas e reaceleradas resultando em quedas de pressão elevadas. O comprimento de tubo reto necessário, antes de os sólidos atingirem novamente a sua velocidade de estado estacionário, pode ser considerável.

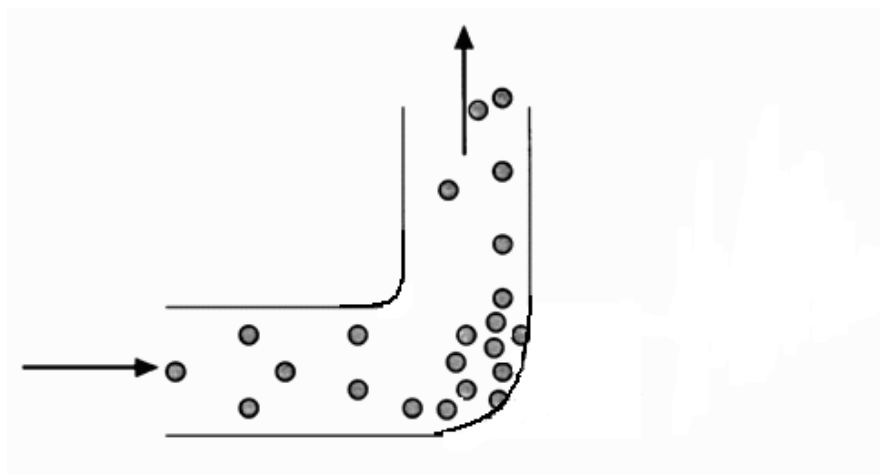


Figura 25 – Ação da força centrífuga [5].

Para transporte de produtos pouco abrasivos, na maioria dos casos, utilizam-se curvas em aço carbono ou fabricadas a partir de tubos sem costura. Usualmente adota-se o raio de curvatura mínimo igual a $2,5D$, sendo D o diâmetro da tubulação. Também são utilizadas curvas obtidas pela conformação a quente de tubos obtendo-se curvas com grande raio de curvatura em média de $5D$ a $10D$, em aço carbono comercial, aço inoxidável ou liga de alumínio. Quando o produto exige reforços nas curvas, devido a abrasão, são fundidas ligas especiais, com calotes removíveis para facilitar a troca e a manutenção.



Figura 26 – Exemplos de Curvas de raio longo.

4. Características dos produtos transportados

4.1. Densidade relativa e dimensão da partícula

As características do produto devem ser conhecidas para que seja determinada as variáveis fundamentais no dimensionamento do sistema de transporte pneumático. Também são necessárias para o dimensionamento de equipamentos concretos tais como válvulas rotativas e dispositivos de alimentação. A densidade relativa do material deve ser determinada no seu estado natural sem haja compactação do material.

4.2. Ângulo de deslizamento e ângulo de repouso

Para caracterizar o produto quanto ao escoamento, é necessário o conhecimento de três ângulos principais:

Ângulo de deslizamento, que é necessário para determinar o coeficiente de fricção, que é usado no cálculo da perda de carga do escoamento que flui através das condutas (Figura 27).

Este angulo é obtido através da inclinação de uma superfície até atingir o deslocamento do material, o angulo entre a superfície horizontal e a superfície inclinada fornecerá o ângulo de deslizamento.

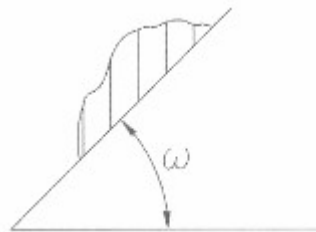


Figura 27 – ω =Ângulo de deslizamento [5].

Ângulo de repouso é o ângulo que o produto forma com o horizonte quando derramado em uma pilha; É uma indicação da fluidez do produto. Geralmente um ângulo de menor que 30° propicia uma excelente fluidez. Um ângulo entre 30° e 45° propicia ao produto uma boa fluidez, porem ângulos acima de 45° diminui a fluidez do produto na linha (Figura 28).

Ângulo de escoamento e determinado com a horizontal, gerando o monte cônico formado pelo produto, o qual ocorre o seu escoamento para baixo (Figura 28).

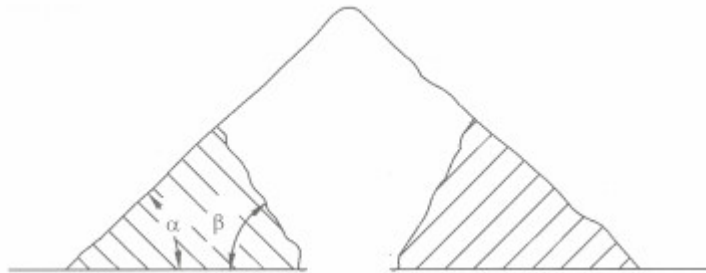


Figura 28 – Ângulos de talude em repouso e de escoamento: α = ângulo de repouso e β = ângulo de escoamento [5].

4.3. Abrasividade do produto

Materiais que possuem pouca abrasividade no seu estado natural tornam-se extremamente abrasivos num sistema de transporte pneumático, devido ao efeito do atrito nas paredes da tubagem.

Devido a este fenómeno, são aplicadas placas especiais de desgaste em pontos de choque, curvas com peças substituíveis e coberturas de borracha natural também são usadas. Curvas especiais de liga de níquel podem ser adequadas dependendo da abrasividade do material transportado. Essas curvas estão disponíveis em segmentos de 15° e somente os segmentos danificados são substituídos. Válvulas rotativas são danificadas após cerca de 300 horas de operação quando transportando cimento; areia pode danificar uma válvula rotativa após a descarga de um vagão de um comboio do mesmo material.

Para quantificar a resistência que um material oferece ao atrito é generalizadamente utilizada a escala de dureza de *Mohs*, escala esta, criada por *Friedrich Mohs* em 1812 que utiliza 10 minerais de diferentes durezas, atribuiu a estes valores de 1 a 10. O valor 1 foi

dado ao talco e o valor 10 foi dado ao diamante que é a substância natural mais dura encontrada na natureza.

Material	Dureza de Mohs	Material	Dureza de Mohs
Talco	1	Feldspato	6
Gesso	2	Quartzo	7
Calcita	3	Topázio	8
Fluorita	4	Safira	9
Apatita	5	Diamante	10

Tabela 5 – Escala de dureza de Mohs [5].

4.4. Materiais higroscópios

Para estes materiais é desejável o condicionamento do gás para sistemas de médio porte. Em circuitos fechados, previne-se misturas húmidas devido ao facto de que o ar utilizado para o transporte é reciclado e somente o ar tratado é fornecido. Para este caso sem equipamento de condicionamento, o material retira a humidade do ar devido ao facto do ar estar em contacto direto com o material que é recirculado no circuito.

4.5. Material explosivo

Quando ocorre este caso, um circuito fechado com sistema de gás inerte é requerido um sistema de ventilação.

4.6. Produto tóxico ou corrosivo

Para produtos tóxicos é normalmente utilizado um sistema de pressão negativa para se assegurar que não ocorra vazamento do produto. As substâncias corrosivas requerem o mesmo procedimento.

4.7. Ponto de fusão

O ponto de fusão do produto é muito importante. Pode ser necessário o arrefecimento do ar na saída do soprador para evitar a fusão do produto. Em algumas situações, grandes massas do produto podem receber energia do calor do ar com um incremento pequeno na sua temperatura.

4.8. Índice de humidade

Dependendo do processo, o produto transportado pode ser seco durante o transporte. Neste caso, trocadores de calor ou equipamentos de ar condicionado necessitam ser instalados no sistema de transporte.

4.9. Eletricidade estática

Quando os produtos apresentarem alta eletricidade estática, o sistema de transporte deve ter um sistema de ligação á terra. A humidade deve ser controlada e/ou equipamentos especiais para eliminação da eletricidade estática devem ser usados.

4.10. Outros problemas

Produtos que contem mais que 10% de gordura ou óleo podem criar problemas com acumulação nas curvas, separador ciclone e filtros de receção. A força centrífuga e o aquecimento gerado pelo atrito causam a separação da gordura nestes equipamentos. Isto, em alguns casos, pode ser minimizado pelo aumento do raio da curva. A introdução de calor nestas regiões poderá também ajudar. Uma curva flexível agitada periodicamente ajuda a livrar a acumulação. Lavagem com água quente ou vapor pode também ser necessária.

Os materiais com forte odor são tratados normalmente da mesma forma que produtos tóxicos ou corrosivos. *Spray* desodorizante pode ser requerido se o ar do sistema de transporte é eliminado para a atmosfera. Impurezas no produto podem modificar

completamente as suas características. Alguns materiais que normalmente não são abrasivos, podem alterar a sua condição, devido á introdução impurezas.

5. Metodologia de projeto de fase diluída

Um projeto de fase diluída deve ser desenvolvido em quatro grandes etapas descritas abaixo:

- Estudo do material a ser transportado, bem como a determinação das suas propriedades físicas;
- Dimensionamento dos equipamentos;
- Definição da instrumentação;
- Desenvolvimento do sistema de controlo e automação.

5.1 Aspetos de projeto de transporte de sólidos em fase diluída

O projeto de um sistema de transporte de fase diluída envolve o estudo do material a ser transportado (granulométrica e massa específica aparente), a determinação de caudal volumétrico de ar e da velocidade de ar necessária para transporte, o dimensionamento de componentes do sistema como a válvula rotativa responsável por descarregar o material na tubulação de transporte de acordo com o caudal massico de material solicitado, o cálculo da potência necessária para que o soprador seja capaz de fornecer ar com velocidade e pressão suficientes para carregar o material ate o ponto desejado e, finalmente, o filtro de mangas para evitar que sólidos em suspensão cheguem a poluir o meio ambiente. Portanto são necessários os seguintes dados de entrada:

- Definição do sólido a ser transportado;
- Massa específica aparente do sólido;
- Granulometria do sólido;
- Caudal massico de material a ser transportado;
- Conceção do sistema de transporte incluindo todas as curvas, válvulas;
- Equipamentos de coletores.

6. Projeto do sistema de transporte pneumático em fase diluída de fertilizante orgânico

Para a elaboração de projeto de transporte de fertilizante orgânico, foi tido em conta que a abordagem matemática é a mais utilizada e com maior grau de confiabilidade neste tipo de projeto, já que não houve a possibilidade de realização de testes preliminares de transporte do produto a ser transportado. De seguida apresenta-se uma metodologia logica da sequência de projeto para o projeto de transporte pneumático.

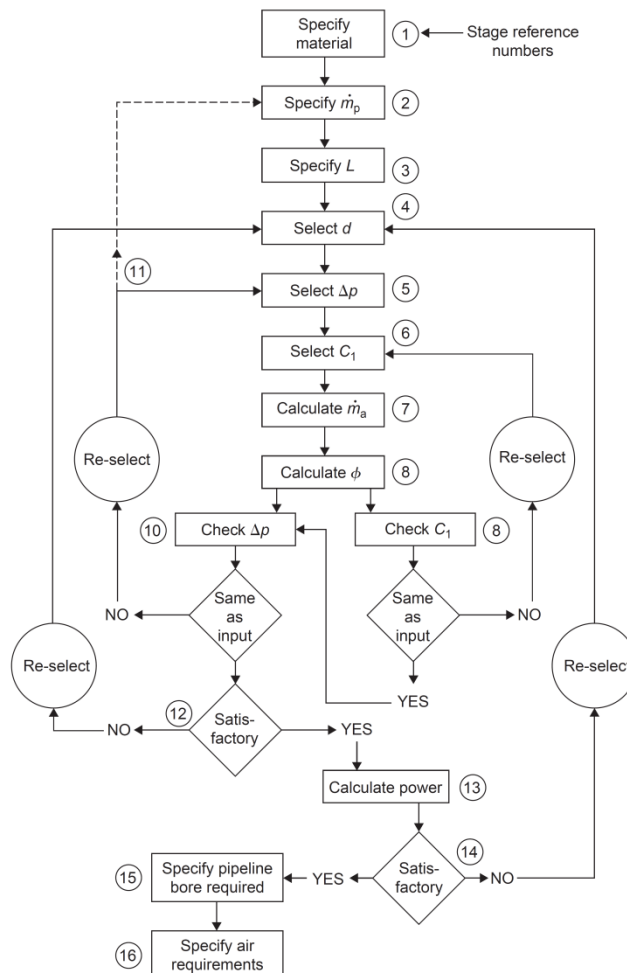


Figura 29 – Diagrama lógico de projeto pneumático baseado no modelo matemático [2].

6.1. Caracterização do produto a transportar e local de instalação.

Nesta fase interessava determinar as características granulométricas e físicas do produto que irá ser sujeito a transporte pneumático, desta forma.

O objetivo seria o transporte de produto de dois tipos de granulometrias que iremos identificar como:

- Bons – $1 \leq d_p \leq 3$ [mm];
- Finos – $d_p < 1$ [mm].



Figura 30 – Aspeto da granulometria de produto Bom a ser transportado.

O quadro seguinte foi obtido por ensaios realizados com produto fertilizante orgânico com o procedimento descrito anteriormente, dos quais resultaram os dados apresentados na tabela 6. A tabela apresentada representa o resumo de variáveis que se deve ter em conta nesta fase de procedimento.

Caracterização do produto		
Nome do Produto:	Fertilizante Orgânico	
	Bons	Finos
ρ_p - Densidade das partículas [Kg/m ³]	500	500
d_p - Diâmetro da partícula [mm]	$1 \leq d_p \leq 3$	$d_p < 1$
γ_{par} - Densidade da Partícula [Kg/m ³]	1000	1000
ω - Ângulo de Deslizamento [°]:	60	60
α - Ângulo de Repouso [°]	45	45
β - Ângulo de Escoamento [°]:	45	45
Higroscopia:	Sim	Sim
Teor de Humidade [%]:	10	10
Percentagem de Óleo [%]:	0	0
Abrasividade:	Muito Baixa	Muito Baixa
Propriedades de estáticas:	Não	Não
Toxidade:	Não	Não
Perigosidade:	Não	Não
Odor:	Intenso	Intenso

Tabela 6 – Tabela de caracterização do produto.

Quanto ao local de instalação interessa agora a descrição de dados ambiente a que o produto irá estar sujeito durante o seu transporte.

Caracterização de local de Instalação	
Local	Espanha Galiza
T_{amb} - Temperatura média ambiente [°]	12
Φ - Teor de Humidade Relativa [%]	75
Z – Altitude [m]	478

Tabela 7 – Tabela descritiva do local de instalação.

Para a definição do modo de transporte pneumático podemos desde já identificar através do diagrama de Geldart, como podemos verificar na figura 31.

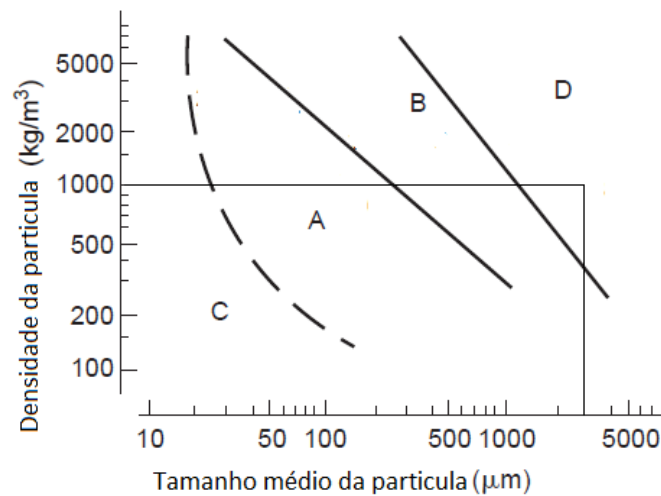


Figura 31 – Diagrama de Geldart, para o transporte pneumático de fertilizante orgânico.

Sendo que a densidade da partícula, γ_{par} , é de 1000 [Kg/ m³] e o diâmetro médio, d_m , é de 3 [mm], como sendo a granulometria máxima encontrada, obtemos uma correspondência na zona D onde o transporte em fase diluída deve ser assumido pois estas partículas devem ser transportadas em altas velocidades.

6.2. Cálculo do caudal massico do sistema

No sistema a implementar pretendia-se que em ambas as linhas do transporte pneumático, um caudal mássico de produto, W_s , na ordem das 10000 [Kg/h], o que corresponde a cerca de 20 [m³/h] em unidades de caudal volúmico se sólidos - Q_s , por forma a poder abastecer os vários sistemas sem interrupção.

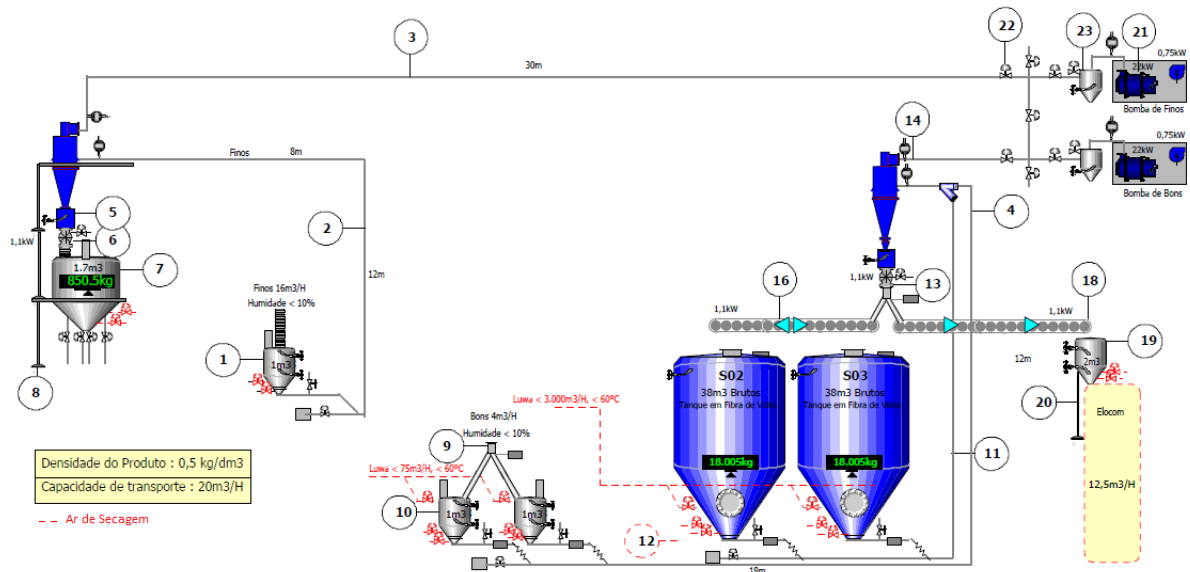


Figura 32 – Diagrama de processo

Como podemos observar do diagrama de processo da área fabril podemos identificar que a Capacidade do sistema - C - será de 10000 [kg/h] como já foi mencionado atrás.

Como também podemos identificar o abastecimento dos silos de secagem vai ser feito em ciclos de enchimento por forma a permitir o tempo suficiente para o nível de secagem desejado das partículas, o gráfico seguinte descreve os ciclos de enchimento/transporte para o produto nas duas linhas de enchimento.

Assim para o escalonamento dos ciclos de transporte foi tido em conta os seguintes requisitos para o sistema de transporte:

Tempos de Funcionamento do processo de transporte por vácuo:

- Produção de Bons: caudal volúmico de 4 [m³/h] (enchimento alternado de duas tremonhas de 1 [m³] de capacidade cada);
- Enchimento Silos com volume útil de 38 m³: caudal de 20 m³/h (Vazamento alternado das tremonhas de capacidade 1 [m³]);
- Início da Secagem coincidente com o início de enchimento de cada silo;
- Tempo de permanência em secagem sem enchimento de 8 horas;
- Funcionamento da Máquina de embalagem para um caudal volúmico de 12,5 [m³/h];

- Enchimento da Tremonha *buffer* da Máquina de embalagem com volume útil de 2 [m³]: Caudal de 20 [m³/h];
- Produção diária de 38000Kg de Fertilizante;
- Ensacamento de 1520 sacos de 25Kg.

Horário	21 horas de pré produção				8horas 8:00 às 16:00	8horas 16:00 às 24:00	8horas 24:00 às 08:00	8horas 8:00 às 16:00	8horas 16:00 às 24:00	8horas 24:00 às 08:00	8horas 8:00 às 16:00
Descrição	Pré Produção				Turno 2	Turno 3	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 1	Turno 2
Silo1	Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas			Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas		Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas		
Silo2		Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas			Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas		Enchiment o/secage m-8Horas	Secagem- 8Horas	
Ensacamen to					3	3		3	3		3

Figura 33 – Diagrama de transporte e secagem.

6.3. Definição do comprimento equivalente da instalação

O projeto do sistema e montagem mecânica foi totalmente elaborado com o auxílio a ferramentas de desenho 3D, ferramenta essencial no projeto neste tipo de construção mecânica, já que se torna bastante difícil a sua percepção só com auxílio de ferramentas 2D tanto em fase de projeto como em fase de montagem.

O figura que se segue representa o traçado do circuito já em fase terminal da sua execução, pelo que o traçado da tubagem tem em conta não só os fatores ótimos de transporte do produto, mas também fatores com:

- Economia de projeto;
- Economia de montagem;
- Economia de funcionamento;

- Fatores físicos de implementação;
- Facilidade de fornecimento;
- Manobrabilidade nas instalações fabris;
- Manutenção.

Podiam ainda ser enumerados outros fatores para a escolha do layout representado, mas de facto os enumerados são os mais importantes e que foram determinantes no traçado da tubagem na zona fabril.

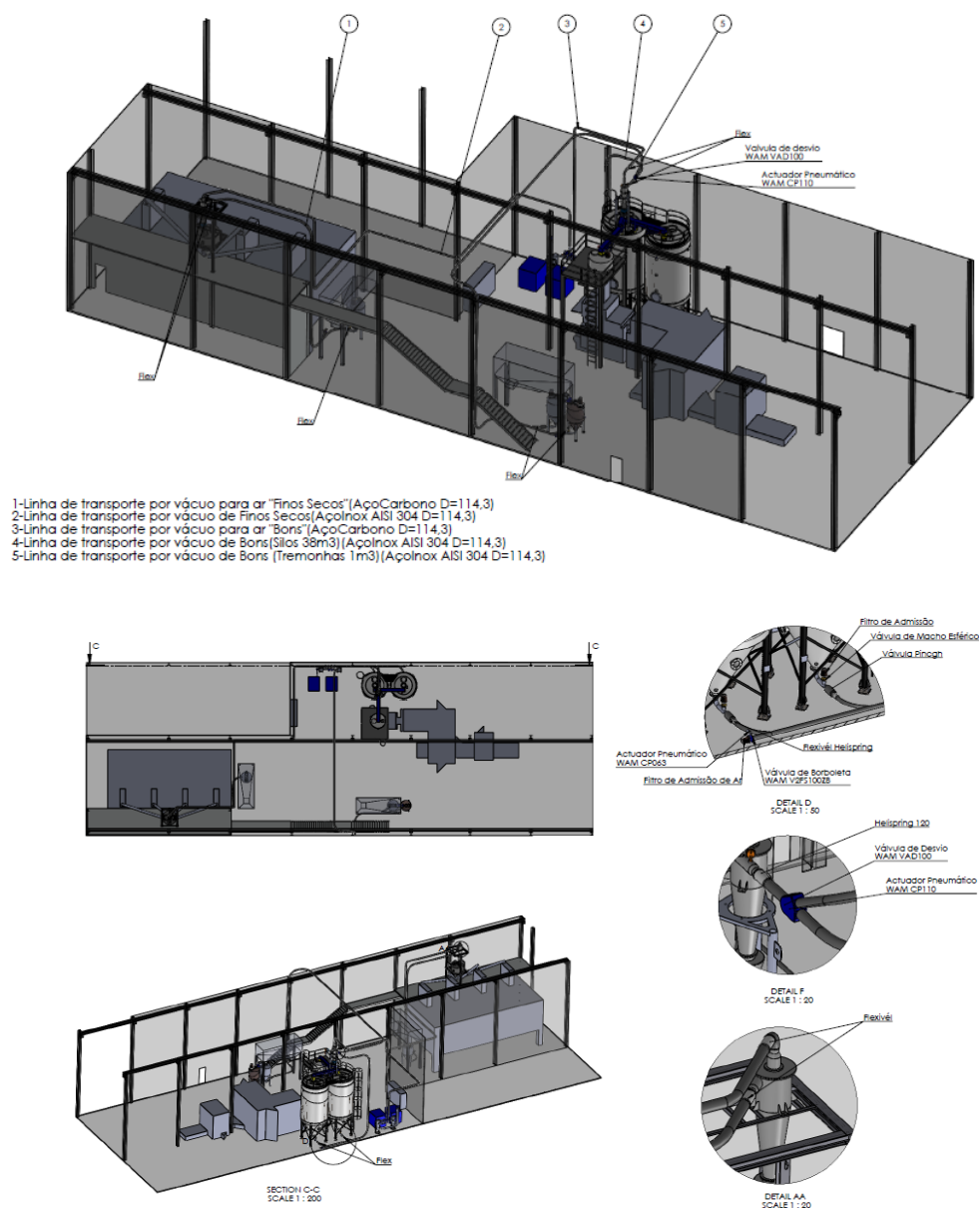


Figura 34 – Layout fabril com representação do traçado da tubagem.

Assim por forma a resumir as características do traçado da tubagem foi elaborado o quadro seguinte onde se resume as quantidades e características da tubagem por forma a simplificar o cálculo dos comprimentos equivalentes:

Linha de Bons						Linha de Finos		Tipo
Traçado de enchimento da tremonha com capacidade de 2 m³		Traçado de enchimento do Silo 1 com capacidade de 38 m³		Traçado de enchimento do Silo 2 com capacidade de 38 m³				
Tubagem Produto	Tubagem Ar	Tubagem Produto	Tubagem Ar	Tubagem Produto	Tubagem Ar	Tubagem Produto	Tubagem Ar	
32392	8101	13739	8101	10539	8101	14699	108106	Compriment o dos Troços Horizontais [mm]
12753	10433	10598	10433	10598	10433	10409	8694	Comprimento dos Troços Verticais [mm]
6	-	4	-	3	-	3	-	Curvas 90º R1000 [Qtd.]
-	6	-	6	-	6	-	10	Curvas 90º R114 [Qtd.]
						1	1	Curvas 45º [Qtd.]
2	-	-	-	-	-	-	-	Curvas 30º [Qtd.]

Tabela 8 – Quadro resumo das características da Tubagem de transporte pneumático.

Interessa então expressar todas as curvas e mudanças de direção em termos de comprimento equivalente, por isso recorrendo aos gráficos das figuras 35 e 36.

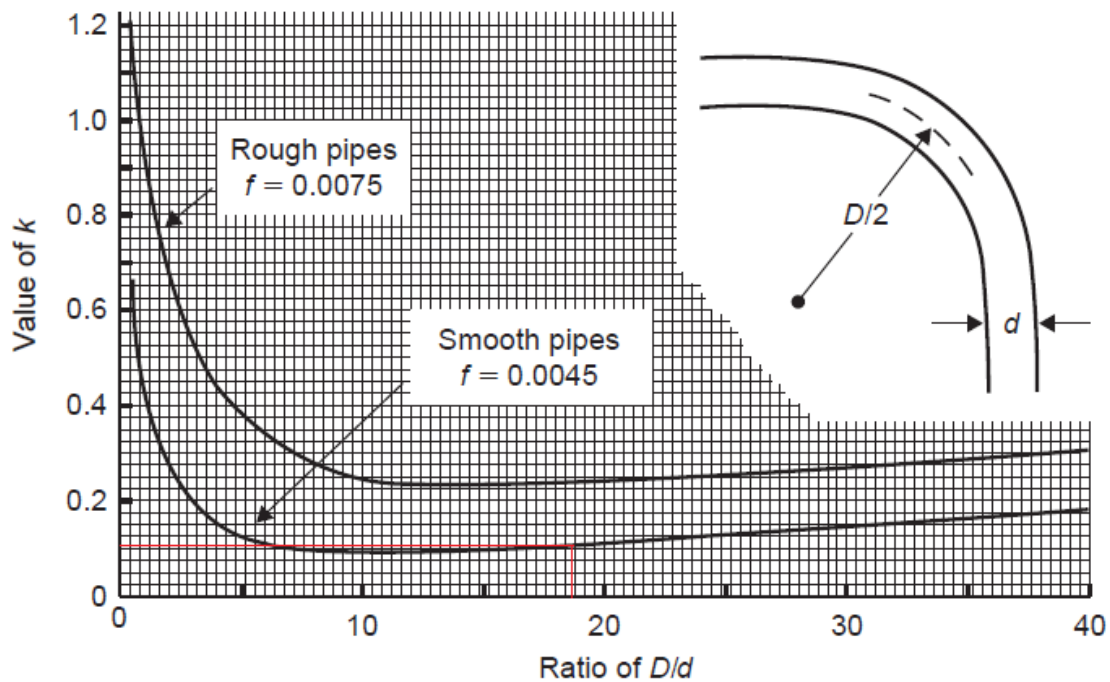


Figura 35 – Perdas em curvas de 90° [2].

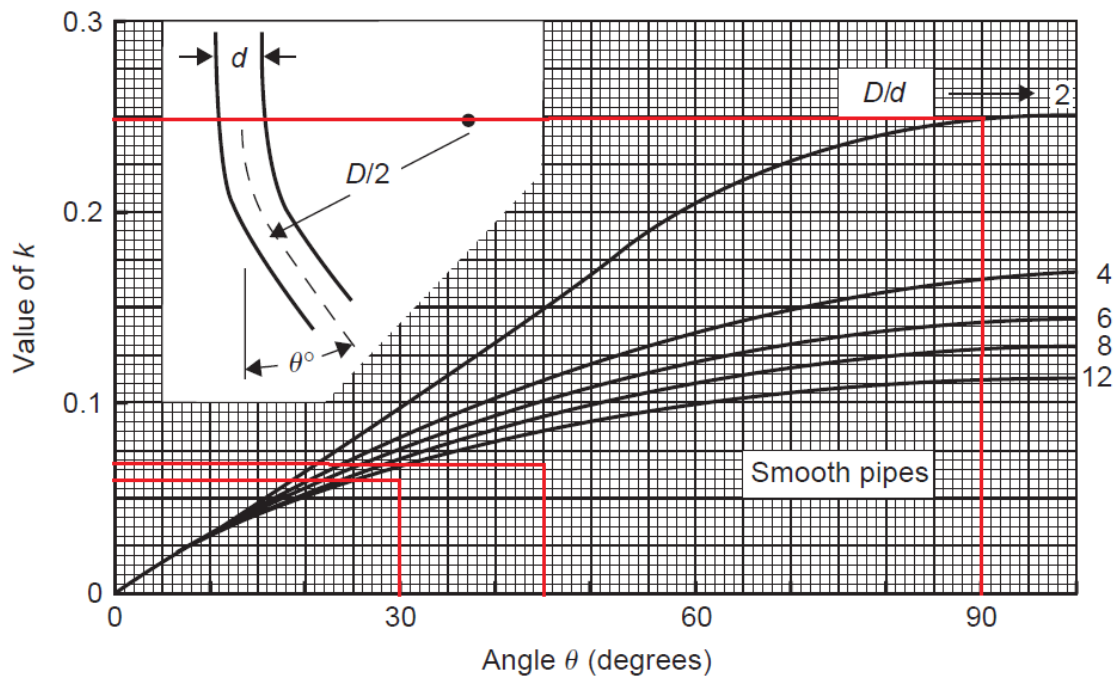


Figura 36 – Perdas em mudanças de direção [2].

O valor representado na figura foi baseado no cálculo do rácio $D/d=18,3$ para um fator de fricção para tubagens lisas de $f=0,0045$, onde $D=2000\text{mm}$ e $d=110,3\text{mm}$.

Como podemos observar com as curvas a 90° raio 1000 mm utilizadas obtemos um valor de $K=0,1$, para mudanças de direção 30° o $K= 0,06$ e para 45° o $K= 0,07$, também foram utilizadas nas tubagens de ar curvas a 90° com Raio 114mm onde se obtém um $K=0,25$.

Utilizando a expressão de comprimento equivalente:

$$L_e = \frac{k \times d}{4 \times f} [m] \quad (24)$$

Obtemos os seguintes valores de L_e para os vários tipos de mudanças de direção implementados.

Curvas 90° R1000 mm [mm]	Curvas 90° R114 mm [mm]	Curvas 45° R1000 mm [mm]	Curvas 30° R1000 mm [mm]	Tipo/Comprimento equivalente
613	1532	429	368	L_e [mm]

Tabela 9 – Comprimentos equivalentes das curvas utilizadas.

Após a obtenção dos valores de comprimento equivalente para os várias secções de tubagem utilizados estamos em condições de corresponder em termos de comprimento equivalente total da tubagem como sendo a soma de todos os comprimentos equivalentes e que corresponde a L_e :

Linha de Bons (1m3)		Linha de Bons (silo 1)		Linha de Bons (Silo 2)		Linha de Finos		Tipo
Produto	Ar	Produto	Ar	Produto	Ar	Produto	Ar	
49559	27726	26789	27726	22976	27726	27376	132549	L_e [mm]

Tabela 10 – Comprimentos equivalentes da Tubagem.

6.4. Seleção do diâmetro interno da tubagem

Para a obtenção deste fator mais uma vez foi tido em conta fatores como diâmetros normalizados dos componentes a utilizar e como consequência disso a primeira iteração recaiu para a tubagem DN100 com Diâmetro externo de 114,3 [mm] e com espessura de 2mm o que faz com que o Diâmetro interno da tubagem seja $d=110,3$ [mm].

6.5. Seleção da perda de carga do sistema

Nesta fase importa estimar um valor de perda de carga do sistema com base em resultados obtidos empiricamente em outras instalações ou na literatura da especialidade para os diversos materiais e condições da instalação.

Para o material em estudo, e com base na pesquisa efetuada nunca foi avaliado em nenhum estudo, no entanto com base nas condições da instalação, características do produto podemos estimar uma perda de carga na ordem dos 0,500 [Bar].

Este valor tal como indicado no diagrama lógico de cálculo de sistemas pneumáticos vai ter de ser revisto por forma a corrigir o valor com base no modelo matemático.

6.6. Seleção da velocidade do ar de transporte.

Para a obtenção deste fator retomamos as equações descritas na primeira parte desta tese para o cálculo das velocidades do ar de transporte, através das equações:

$$V = 37\sqrt{\rho_p} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \left(0,15 \leq \rho_p \leq 2 \left[\frac{t}{m^3} \right] \right) \quad (25)$$

Para $\rho_p = 0,500 \text{ t/m}^3$, Obtemos $V = 26,16 \text{ m/s}$

$$V = (4,11 \times \sqrt[3]{\rho_p} \times \sqrt{D_p}) + (23,4 \times \sqrt{\rho_p}) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (26)$$

Para $\rho_p = 0,500 \text{ t/m}^3$; $D_p = 3\text{mm}$, Obtemos $V = 22,19 \text{ m/s}$

Sendo estes valores bem diferentes optámos por tomar como primeira aproximação o valor de $V = 26,16 \text{ m/s}$, sendo que se trata de o valor mais alto obtido, no entanto é necessário reavaliar este valor pois, a velocidade como já foi enunciado tem uma grande influência na perda de carga do sistema de transporte, pelo que velocidade excessiva nas tubagens de transporte pneumático pode originar maiores perdas de carga e consequentes aumentos no custo total do sistema.

Apesar desta consideração vamos adotar para velocidade de admissão de produto o valor de obtido na equação afetado de 20% de margem, como nos é sugerido em [1].

$$V_{20\%} = 1,2 \times V \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (27)$$

Para $V = 26,16 \text{ m/s}$, temos $V_{20\%} = 31,39 \text{ [m/s]}$

6.7. Seleção do caudal mássico de ar de transporte.

Nesta fase interessa então o cálculo do caudal mássico de ar necessário ao transporte, através da equação dos gases perfeitos foi obtida a equação (28) [1], com esta equação, transcrita em função da pressão de admissão do produto, velocidade de entrada de produto e diâmetro interno da tubagem.

$$W_a = \frac{2,74 \times p_1 \times V_{20\%} \times d^2}{T_1} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] \quad (28)$$

Onde:

- W_a - Caudal massico de ar [Kg/s];
- p_1 - Pressão de admissão de produto [kN/m²];
- $V_{20\%}$ - Velocidade de admissão de produto [m/s];
- T_1 - Temperatura de admissão de produto [K];
- d - Diâmetro interno da tubagem [m].

Tomando o valor p_1 como pressão atmosférica, pois trata-se de um transporte pneumático negativo $p_1 = 101,3 \text{ [kN/m}^2\text{]}$; $V_{20\%} = 31,39 \text{ [m/s]}$; $T_1 = 285,15 \text{ [K]}$ (temperatura estimada para a média anual do local de 12°C) e $d = 0,1103 \text{ [m]}$, obtemos então $W_a = 0,37 \text{ [Kg/s]}$

6.8. Seleção da relação de sólidos de transporte.

A partir da equação:

$$X = \frac{W_s}{4,29 \times Q_a} \text{ [adm.]} \quad (29)$$

Tomando o valor $Q_a = 0,37 \text{ [Kg/s]}$; e $W_s = 2,78 \text{ [Kg/s]}$, Obtemos então uma Relação de sólidos em massa no transporte $X = 1,75 \text{ [adm.]}$

6.9. Verificação da perda de carga do sistema.

Introduzindo a equação do calcula da perda de carga total:

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times L_t \times (X + 3,5) \times \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \times \varphi \times X \times V^2 + \Delta P_e \right] \times 10^{-4} \text{ [Kg/cm}^2\text{]} \quad (30)$$

Sendo:

- L_t - Comprimento total [m];
- V - Velocidade de transporte [m/s];
- D - Diâmetro interno da tubagem [mm];
- X - Relação de massa de solido transportado [kg sólidos / kg ar];
- φ - Fator de redução;
- ΔP_e - Perda de carga dos equipamentos [mm].

Calculando para os diferentes troços de tubagem obtemos:

Linha de Bons (1m3)		Linha de Bons (Silo 1)		Linha de Bons (Silo 2)		Linha de Finos		Tipo
Produto	Ar	Produto	Ar	Produto	Ar	Produto	Ar	
49559	27726	26789	27726	22976	27726	27376	132549	L_e [mm]
0,342		0,308		0,302		0,468		ΔP_t [kg/cm ²]

Tabela 11 – Comprimentos equivalentes para os troços de tubagem.

Como podemos observar a perda de carga obtida para a conduta relativamente mais longa, em termos de comprimento equivalente seria a linha de finos, onde a perda carga obtida para o transporte de produto obtido nesta tubagem foi de aproximadamente 0,5 Bar.

Posto isto verifica-se que não é necessário modificar o valor de perda de carga estimado nem alterar o diâmetro da conduta para o transporte do produto.

O cálculo que se segue será então o cálculo da potência necessária do sistema.

6.10. Potência necessária do sistema.

O cálculo da potência consumida pelo sistema foi então um fator crítico por forma a validar o investimento no sistema de transporte pneumático em fase diluída. Para o calculo da potência foi utilizada a equação (31)

$$P = 165 \times W_a \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad [kW] \quad (31)$$

Onde :

- W_a - Caudal massico de ar [Kg/s];
- p_1 - Pressão de entrada da tubagem [bar abs];

- p_2 - Pressão de saída da tubagem [bar absoluto].

Substituído as variáveis por os valores da instalação obtemos $P = 40\text{kW}$.

Este valor de potência deve servir apenas como estimativa da potência total necessária para a instalação, para a seleção exata da bomba de vácuo é necessário a consulta das tabelas dos equipamentos do fabricante para assim obter a potência necessária da instalação.

6.11. Seleção da bomba de vácuo para o sistema.

Tal como descrito anteriormente, para a seleção da bomba de vácuo necessária é necessário a consulta dos dados técnicos das bombas de vácuo, onde por força de condições de fornecimento, a escolha recaiu sobre as bombas tipo “Roots” da empresa Pedro Gil com as características que a seguir se enumeram.

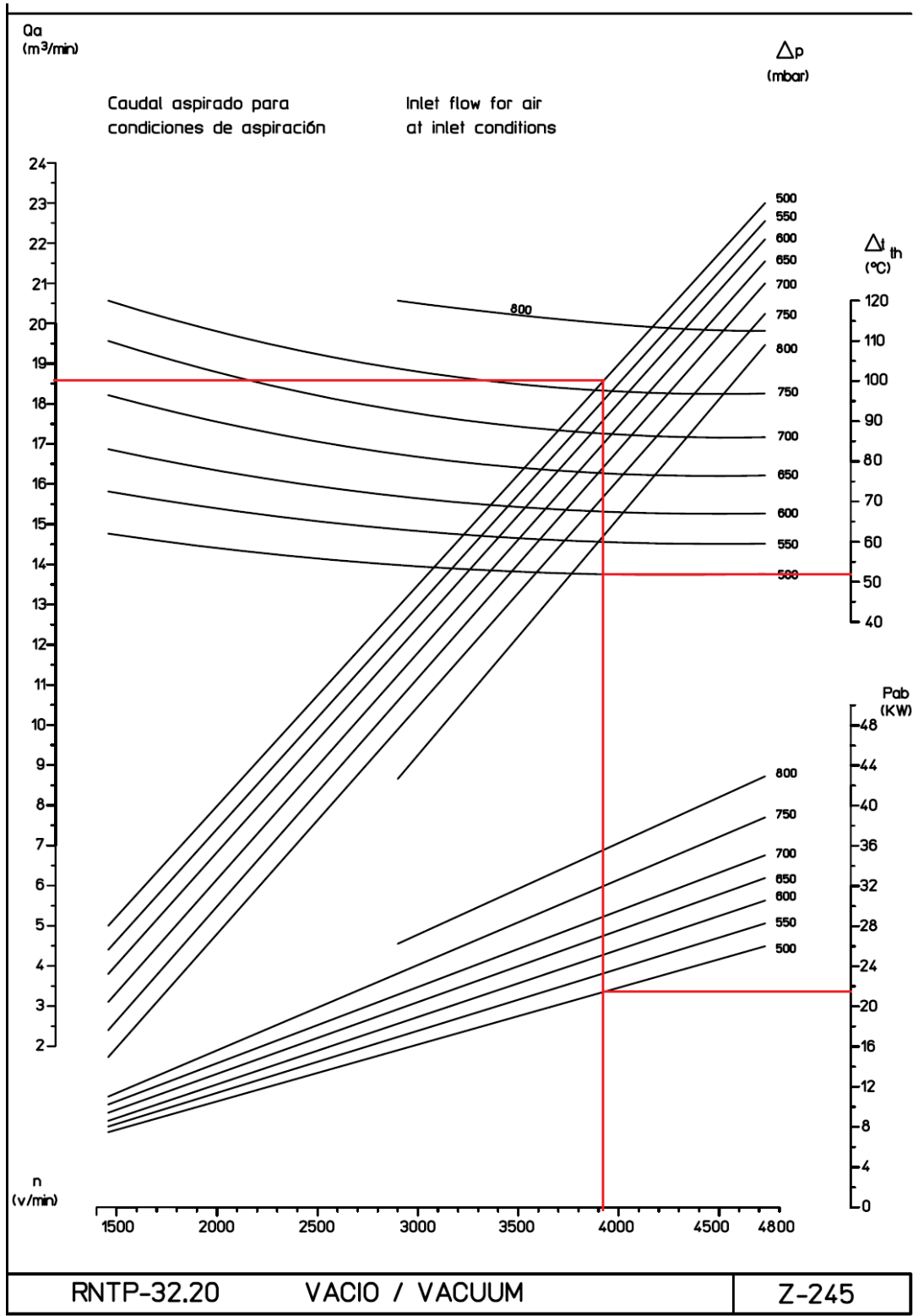


Figura 37 – Tabela de potência de bomba de vácuo RNT-32.20 [37].

Como se pode observar a partir do diagrama de potência fornecido pela marca para a bomba de vácuo as potencia consumidas para os dados da instalação são bem inferiores. Caso já alertado pela literatura.

Os dados que foram tidos em conta para a seleção da bomba são para além dos fatores de ordem prática tais como, diâmetro da tubagem de vácuo, espaço de ocupação, consumo e ruído, sendo que o fator ruído é um fator muito importante principalmente para grupos que fiquem instalados dentro das unidades de produção.

Os fatores foram então:

$$Q_a = 0,37 [Kg/s] ;$$

$\Delta P_t = 0,468 [Kg/cm^2]$. A escolha do perda de carga será a mais desfavorável pois o grupo de vácuo será partilhado pelos vários troços de tubagem de transporte.

Ao que corresponde uma Potencia absorvida de aproximadamente $P = 22kW$ às 3900RPM.

6.12. Verificação da velocidade de saltitação do produto.

É extremamente importante verificar a velocidade de saltitação para o produto em causa no transporte pneumático, pois como se já referenciou, podemos estar com velocidades abaixo da necessário ao transporte em fase diluída, causa esta que pode originar enormes perdas de carga e acima de tudo, os caudais de produto necessários ao funcionamento da unidade estarem em causa.

Recorrendo á equação (32):

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-1,06} \times \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{3,7} \times \frac{W_s \times 10^{3,61} \times (\sqrt{D \times g})^{3,61}}{(0,373) \times (A \times \rho_f)} \right]^{\frac{1}{3,61+1}} \quad (32)$$

E substituindo os valores do sistema:

$$-Fr_p = 31,66; -V_t = 32,93 \text{ [m/s]}; -d_p = 0,003 \text{ [m]} -d_p^* = 0,003 \text{ [m]} -\rho_f = 1,225 \text{ [kg/m}^3\text{]} -\rho_p = 500 \text{ [kg/m}^3\text{]} -D = 0,1103 \text{ [m]} -A = 0,0096 \text{ [m}^2\text{]} -g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} -W_s = 2,77 \text{ [kg/s]}.$$

Obtemos um valor de Velocidade de saltitação $V_{gs} = 16,03 \text{ [m/s]}$, o que é um valor abaixo do cálculo estipulado para a velocidade da partícula, logo estaremos dentro do transporte em fase diluída, sabendo que abaixo de $V_{gs} = 16,03 \text{ [m/s]}$ entraremos em transporte de fase densa.

6.13. Seleção e dimensionamento do ciclone.

Para a determinação das dimensões do ciclone e a eficiência de coleta esperada foram estipulados os objetivos de projeto para o equipamento de separação gás/sólidos.

A opção caiu sobre o ciclone pois apesar de ter um rendimento de coleta mais baixo que o filtro de mangas, tem nítidas vantagens em relação ao este para o tipo de produto a transportar, pois é de esperar que o produto contenha alguma humidade, o que dificultará a manutenção de um filtro de mangas. Sendo que será integrado um segundo filtro antes da entrada na Bomba de vácuo para capturar as partículas que não serem capturadas no ciclone.

Assim para a seleção e projeto do ciclone foram tidos em conta os seguintes aspectos:

Os ciclones podem ser classificados segundo a sua eficiência e perda de carga da seguinte forma [4]:

- - Ciclones de baixa eficiência: $5 < PC < 10 \text{ cm H}_2\text{O}$;
- - Ciclones de média eficiência: $10 < PC < 20 \text{ cm H}_2\text{O}$;
- - Ciclones de alta eficiência (cone longo): $20 < PC < 25 \text{ cm H}_2\text{O}$.

A eficiência de ciclones é muitas vezes caracterizada pelo seu "diâmetro crítico" ou pelo seu "diâmetro de corte". O diâmetro crítico refere-se ao diâmetro da partícula que o

ciclone coleta com 100% de eficiência. Similarmente, o diâmetro de corte refere-se ao diâmetro da partícula coletado com 50% de eficiência. Podem ser obtidos pelas seguintes expressões (Lapple) apresentadas por LISBOA H. M. e SCHIRMER N. W. (2007) [4]:

$$d_{(100)} = \sqrt{\frac{18 \times \mu_g \times b}{2 \times \pi \times V_i \times \rho_p \times N_V}} \times 10^6 \text{ } [\mu m] \quad (33)$$

$$d_{(50)} = \sqrt{\frac{9 \times \mu_g \times b}{2 \times \pi \times V_i \times \rho_p \times N_V}} \times 10^6 \text{ } [\mu m] \quad (34)$$

Onde:

- $d_{(50)} = d_{corte} \text{ } [\mu m]$;
- b - Largura da entrada do ciclone [m];
- V_i - Velocidade do gás na entrada no ciclone [m/s];
- N_V - Número de voltas do "Vortex" (3 a 10);
- μ_g - Viscosidade do gás [Kg/ms];
- ρ_p - Densidade da Partícula [Kg/m³].

Os ciclones convencionais, bem projetados, apresentam diâmetro de corte da ordem de 8 μm , enquanto os de alta eficiência apresentam diâmetro de corte da ordem de 3 μm .

A eficiência fracionada pode ser calculada pela equação de De Paola e Theodore, qual seja:

$$\eta = \frac{1}{1 + (d_{(50)}/d)^2} \text{ } [\%] \quad (35)$$

Onde:

- d - Diâmetro da partícula [μm].

Para o dimensionamento de ciclones é geralmente aceite o uso de relações geométricas já conhecidas. A Figura 38 e a Tabela 12 apresentam as relações geométricas para ciclones de entrada tangencial segundo vários autores [4].

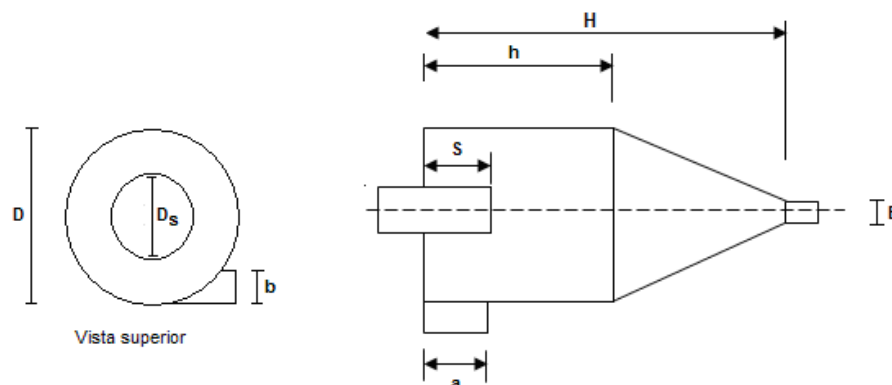


Figura 38 - Relações geométricas para dimensionamento de um ciclone tangencial [4].

A base para o dimensionamento é a velocidade de entrada no ciclone, que na prática varia de 6 a 21 m/s. Os ciclones de alta eficiência são dimensionados para velocidades acima de 15 m/s. O projeto de um ciclone pode ser realizado a partir de estudos já estabelecidos, tais como o de Lapple – Quadro 7. 2 [4].

Elemento Característico	Símbolo	Autor		
		Lapple	Stairmand	Swift
Diâmetro do corpo cilíndrico	D	1,0	1,0	1,0
Altura de entrada	a	0,5 D	0,5 D	0,44 D
Largura de Entrada	b	0,25 D	0,2 D	0,21 D
Profundidade do ducto de saída	S	0,625 D	0,5 D	0,5 D
Diâmetro do ducto de saída	D_s	0,5 D	0,5 D	0,4 D
Altura do corpo cilíndrico	h	2,0 D	1,5 D	1,4 D
Altura Total	H	4,0 D	4,0 D	3,9 D
Diâmetro do duto de descarga do pó	B	0,25 D	0,375 D	0,4 D

Tabela 12 – Relações geométricas padronizadas entre os componentes de um ciclone de entrada tangencial [4].

O fator fundamental para o bom funcionamento de um ciclone é o seu diâmetro. Para uma determinada perda de carga, a eficiência do ciclone cresce em função do raio de giro. Como a perda de carga cresce com o quadrado da velocidade, existe um compromisso entre ambos os fatores, que impede a diminuição do valor do raio para valores mais baixos que levam a perdas de cargas proibitivas. Por isso, a velocidade de admissão deve ser no máximo de 21 [m/s] [4].

No entanto, o fator mais importante nas características da retenção de um ciclone são as propriedades do resíduo a separar. O fator mais importante é o diâmetro da partícula. A utilização de um ciclone é não é eficiente para partículas de diâmetro inferior de 15µm, sendo muito pouco útil para partículas menores que 3 µm [4].

A perda de carga em ciclones de entrada tangencial pode ser estimada pelo método de *Shepherd-Lapple*, com a modificação de *Briggs* para a carga de material particulado. Por este método a perda de carga é expressa por [4]:

$$\Delta p = 8,19 \times 10^{-3} \times \rho_g \times V_i^2 \times \left(\frac{a \times b}{D_s^2} \right) \times \left(\frac{1}{0,0057 \times C_i + 1} \right) [cm H_2O] \quad (36)$$

Onde:

- C_i - Concentração de partículas na entrada [g/m^3];
- Δp - Perda de carga [$cm H_2O$];
- V_i - Velocidade de entrada do gás [cm/s];
- ρ_g - Densidade do gás [Kg/m^3];
- $a \times b$ - Área de entrada [cm^3];
- D_s - Diâmetro de saída [cm].

Para o dimensionamento do ciclone pretendido, são necessários os cálculos dos seguintes parâmetros, já apurados no dimensionamento anterior.

Caudal de gases	0,31m3/s
Temperatura dos gases	70°C
Pressão dos gases	0,49 atm
Concentração de partículas	11,12Kg/m3
Condições normais	0°C a 1atm
Viscosidade dos gases	2,6x10 ⁻⁵ Kg/ms
Densidade das Partículas	500Kg/m3

Tabela 13 – Dados fonte da instalação para dimensionamento do ciclone.

0 – 20[μm]	20 – 30[μm]	30 – 40[μm]	40 – 50[μm]	50 – 60[μm]	60 – 80[μm]	> 80[μm]
2,7 %	6,9%	9,4%	10,5%	10,5%	16,5%	43,5%

Tabela 14 – Distribuição do tamanho das partículas.

Desta forma o cálculo do ciclone terá os seguintes dados:

$$A_1 = \frac{Q}{V_i} = \frac{0,31}{32,93} = 0,0094 \text{ m}^2 \quad (37)$$

$$A_1 = (\text{altura de entrada}) \times (\text{largura de entrada}) = 0,5D_c \times 0,25D_c = 0,125D_c^2 \quad (38)$$

Portanto:

$$D_c = \sqrt{\frac{A_1}{0,125}} = \sqrt{\frac{0,0094}{0,125}} = 0,274 \text{ [m]} \quad (39)$$

Reunindo os dados geométricos do ciclone temos:

Elemento Característico	Símbolo	Relação	Dimensão [m]
Diâmetro do corpo cilíndrico	D	1,0	0,274
Altura de entrada	a	0,5 D	0,137
Largura de entrada	b	0,25 D	0,0685
Profundidade do ducto de saída	S	0,625 D	0,171
Diâmetro do ducto de saída	Ds	0,5 D	0,137
Altura do corpo cilíndrico	h	2,0 D	0,548
Altura total	H	4,0 D	1,096
Diâmetro do duto de descarga do pó	B	0,25 D	0,0685

Tabela 15 – Relações características do ciclone dimensionado.

Determinando a eficiência:

$$d_{(50)} = \sqrt{\frac{9 \times \mu_g \times b}{2 \times \pi \times V_i \times \rho_p \times N_V}} \times 10^6 = \sqrt{\frac{9 \times 2,6 \times 10^{-5} \times 0,0685}{2 \times \pi \times 32,93 \times 500 \times 10}} = 3,93 \text{ [}\mu m\text{]} \quad (40)$$

Eficiência total da coleta:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{(50)}/d_i)^2} \quad (41)$$

$d_i [\mu m]$	$d_i [\mu m]$	$m_i [\%]$	$\eta_i [\%]$	$m_i \times \eta_i [\%]$
0-20	10	2,7	0,866	0,023
20-30	25	6,9	0,976	0,067
30-40	35	9,4	0,988	0,093
40-50	45	10,5	0,992	0,104
50-60	55	10,5	0,995	0,104
60-80	70	16,5	0,997	0,164
>80	90	43,5	0,998	0,434
		$\sum \frac{m_i}{100}$		$\sum \frac{m_i \times \eta_i}{0,991}$

Tabela 16 – Eficiência da coleta.

Eficiência total de coleta:

$$\eta_t = \sum m_i \times \eta_i = 99,1\% \quad (42)$$

Emissão final (E_f)

-Sem controlo:

$$E_i = Q \times C_i = \frac{0,25m^3}{s} \times \frac{11,12Kg}{m^3} = 10.008 \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (43)$$

-Com controlo:

$$E_f = E_i \times (1 - \eta_t) = 90,072 \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (44)$$

6.14. Avaliação do ciclone por elementos finitos.

Para uma melhor obtenção previsão do funcionamento do ciclone recorreremos ao cálculo do escoamento através de elementos finitos. O *software* de cálculo utilizado foi o *CFD Flow Simulation SolidWorks®*. Através deste *software* foi possível prever o escoamento do fluido através do ciclone assim como o comportamento dos sólidos através do escoamento de ar.

De seguida serão apresentados os resultados mais importantes da simulação obtida. Por forma a simular as condições de funcionamento projetadas para o ciclone foram impostas as condições fronteira de:

$$V_i = \text{Velocidade de entrada do gás} = 32,93 \text{ [m/s];}$$

$$\Delta p = \text{Perda de carga} = 50.000 \text{ [Pa]}.$$

Sendo que a abertura de descarga de partículas será colocada á pressão atmosférica.

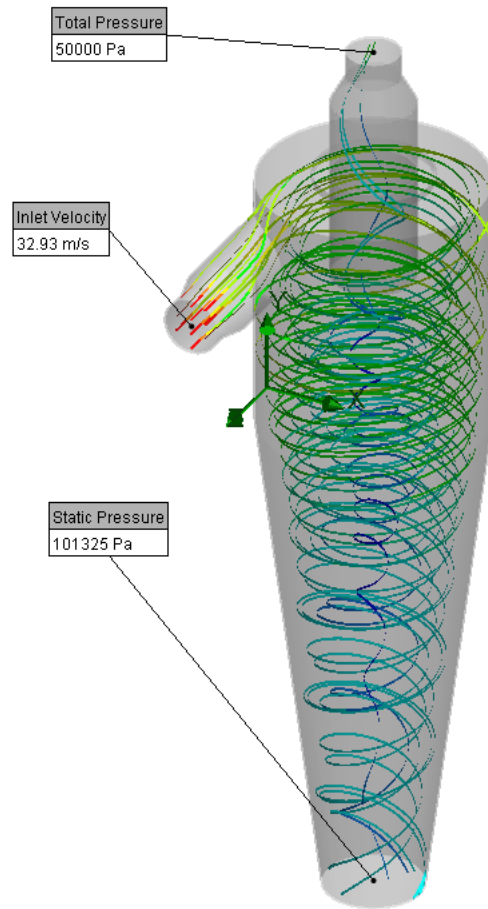
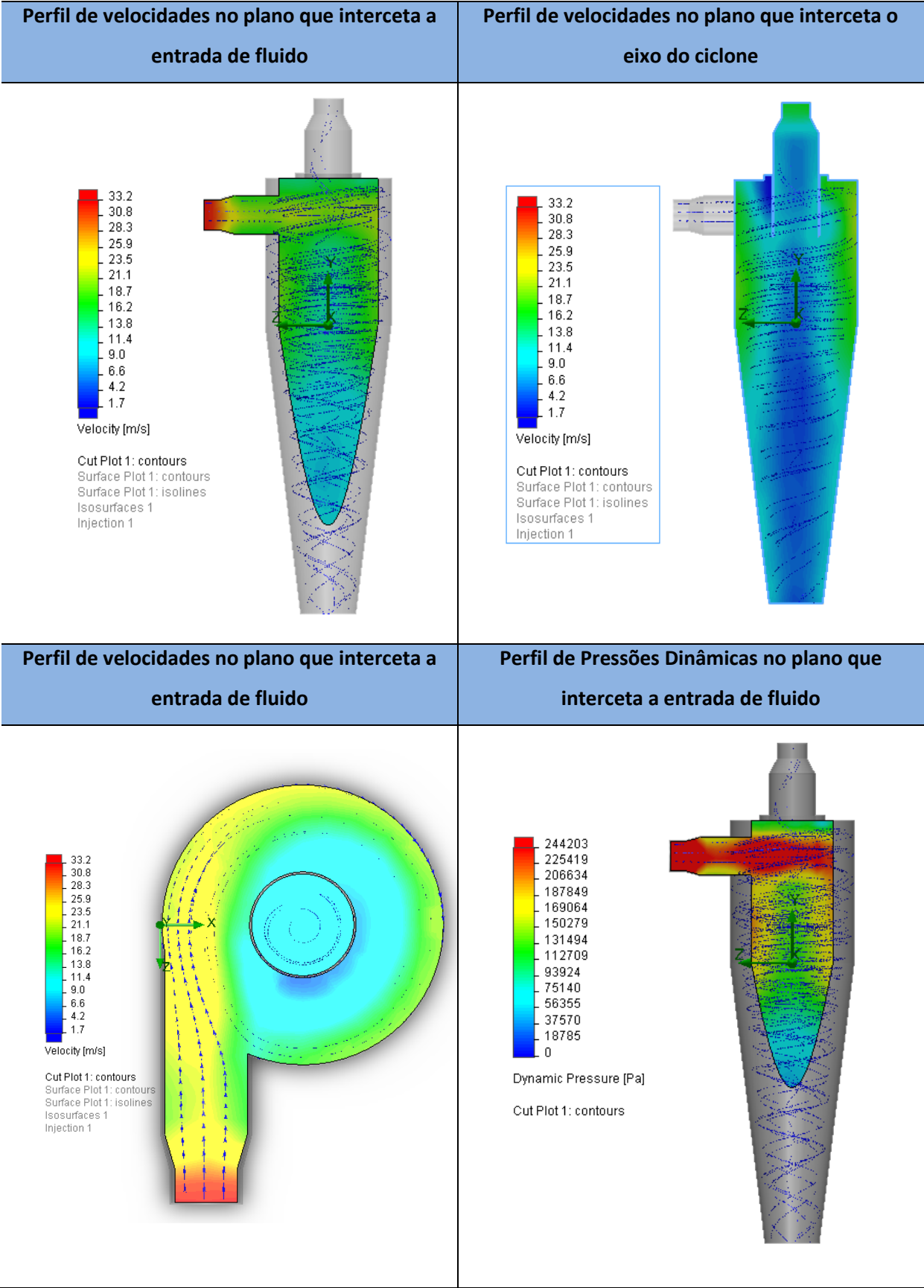


Figura 39 – Perfil de escoamento no interior do ciclone com as condições fronteiras especificadas.

Com o modelo perfeitamente definido quanto às suas condições fronteira, foi feita uma análise em termos de pressão no interior do ciclone e velocidades do fluido em escoamento para assim poder tomar considerações quanto ao bom funcionamento do ciclone. O processo iterativo da geometria do ciclone não se inclui neste trabalho, apenas passaremos a descrever os resultados do modelo que consideramos válido para o projeto do transporte de granulado de fertilizante orgânico.



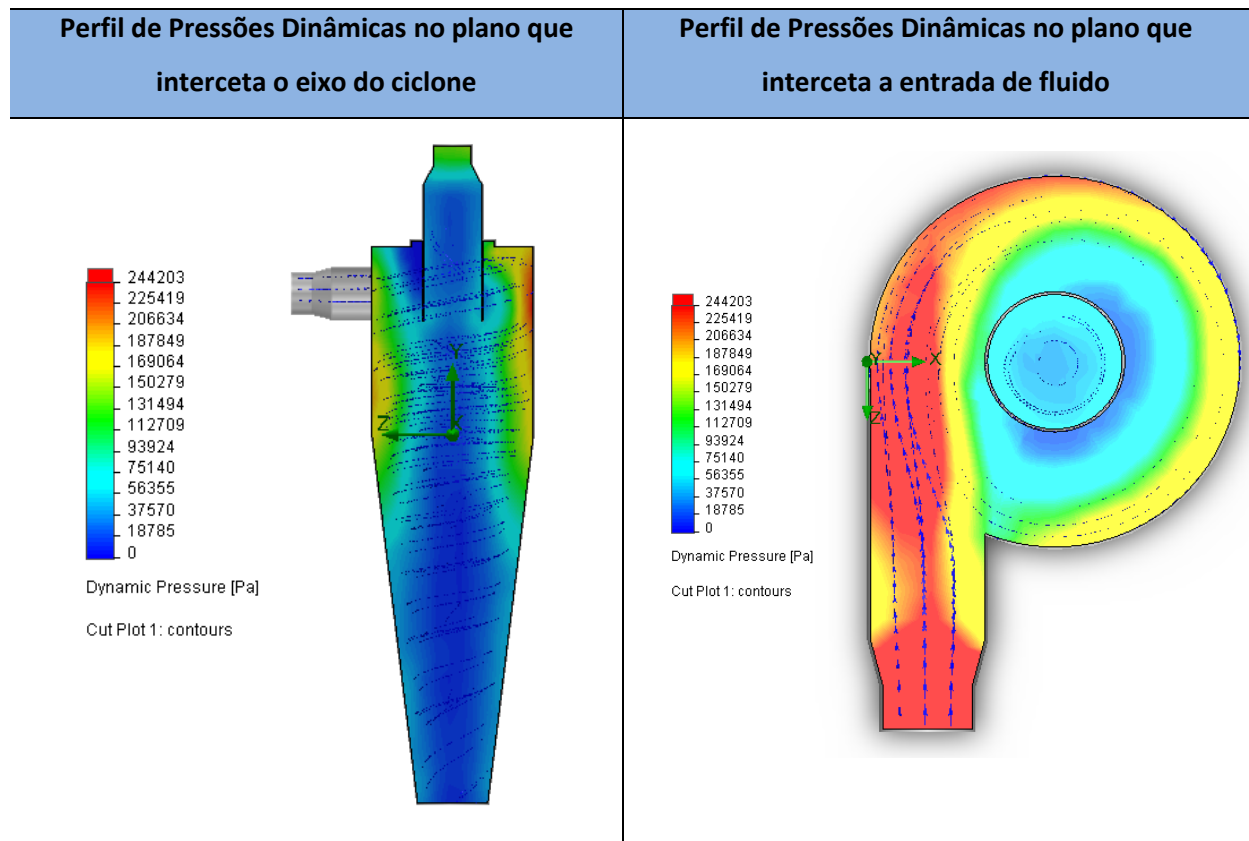


Figura 40 – Avaliação de Velocidades e Pressões dinâmicas no interior do ciclone.

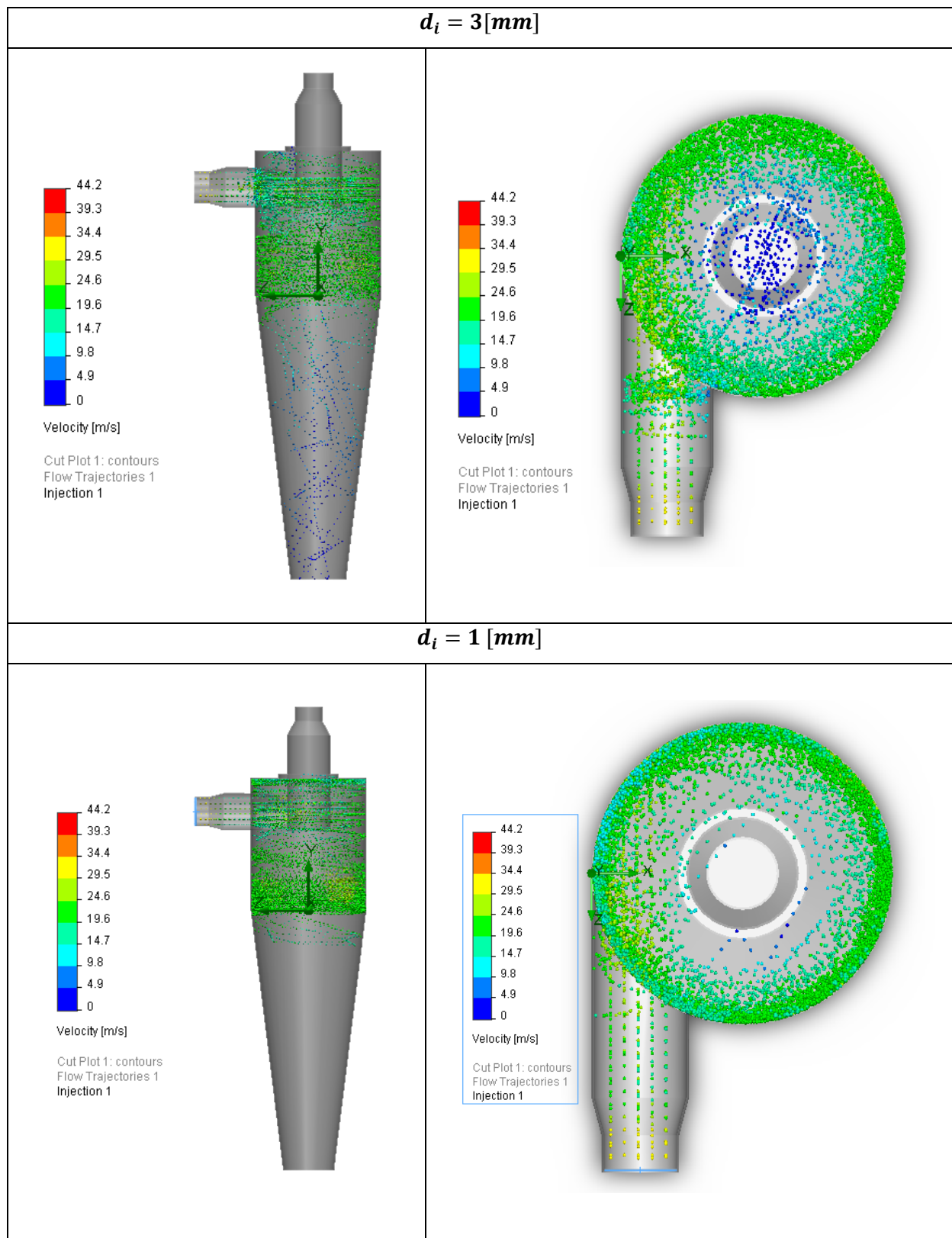
Como se pode avaliar o perfil de velocidades no interior do ciclone assume o formato de ciclone (comportamento que confere o nome ao equipamento). Assim o comportamento do escoamento demonstra um ciclone perfeitamente desenvolvido para assim facilitar a separação de gás/sólido, da forma como já foi explicado anteriormente através da força centrífuga que as partículas adquirem.

Interessa mais tarde proceder a uma avaliação do comportamento mecânico e estrutural deste componente já que estaremos a trabalhar em pressões consideráveis, o que eventualmente pode provocar roturas mecânicas nos materiais empregados na construção do ciclone.

De seguida efetuou-se uma avaliação do escoamento do ciclone com a integração de partículas representativas de cada dimensão verificadas na análise granulométrica.

Como se pode verificar a geometria encontrada apresenta resultados de separação bem superiores para as granulometrias analisadas pelo modelo de Lapple, desta forma a

seguir apresentam-se os resultados em termos de separações obtidas pelo modelo numérico.



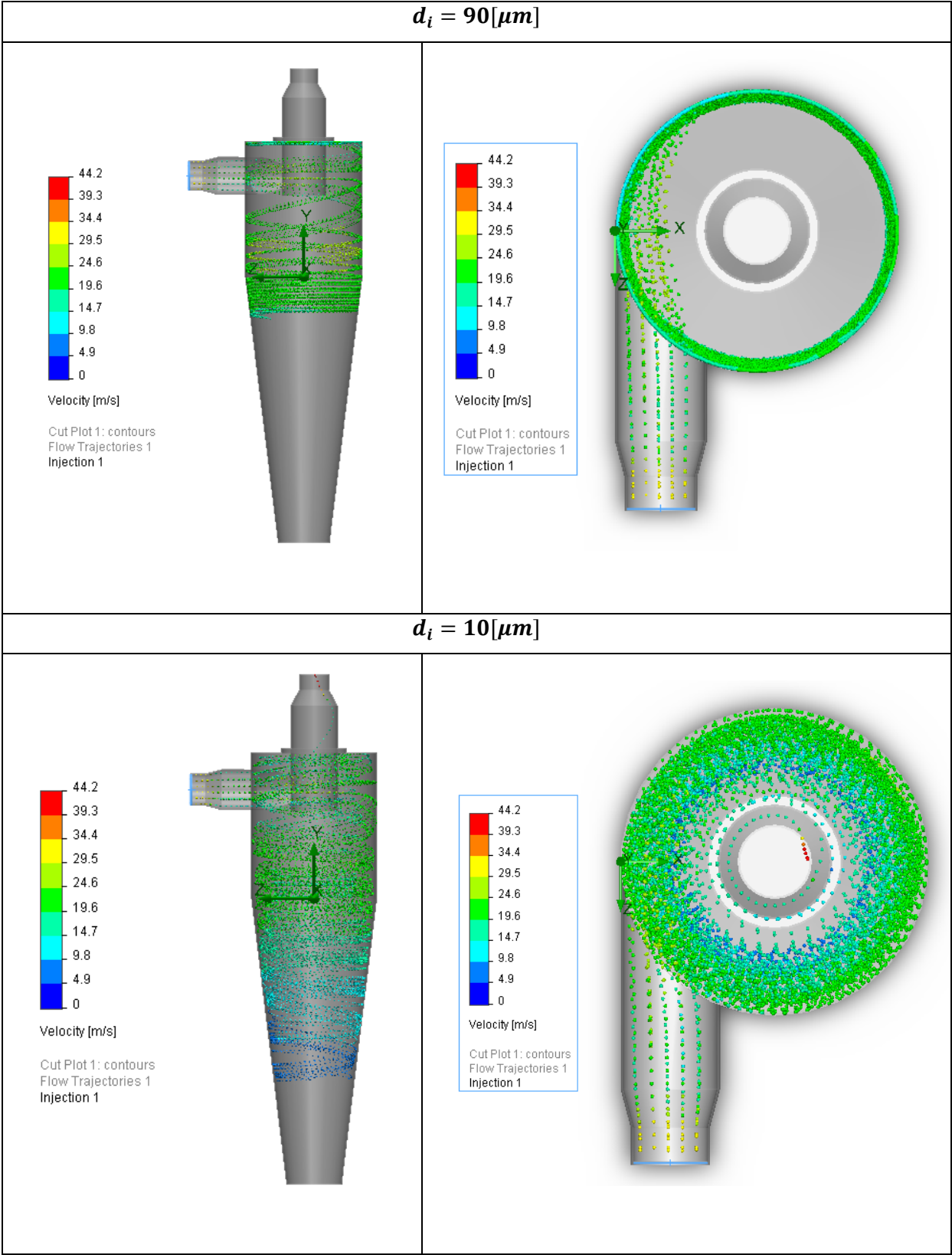


Figura 41 – Escoamento das partículas para várias dimensões.

Como se pode verificar o modelo numérico apresentou dados com índices de separação superiores aos encontrados de forma analítica no modelo lapple.

$d_i [\mu m]$	$d_i [\mu m]$	$m_i [\%]$	$W_s [Kg/h]$	η_i
0-20	10	2,7	270,216	0,8985
20-30	25	6,9	690,552	0,9990
30-40	35	9,4	940,752	0,9992
40-50	45	10,5	1050,84	0,9996
50-60	55	10,5	1050,84	0,9997
60-80	70	16,5	1651,32	0,9998
>80	90	43,5	4353,48	0,9999
		$\sum_{100} m_i$	$\sum W_s$ 10.080Kg/h	

Tabela 17 – Eficiência da coleta obtida através do cálculo de elementos finitos

7. Apresentação de resultados

Após montagem de todos os equipamentos e condutas procedeu-se a uma fase preliminar de testes com produto por forma a validação dos sistemas de transporte pneumático e sistemas de separação de produto (ciclone).

Procedeu-se ao ensaio das linhas de transporte alternadamente por forma a conseguirmos estimar a caudal de transporte e a eficiência de separação de cada linha de transporte.

Como poderemos verificar, apenas foi utilizado produto com características de “bons”, pois por indisponibilidade de produto não foi possível a sua utilização.

Por este motivo a linha de “finos” não servirá para comparação direta entre os resultados numéricos e os resultados obtidos na fase de testes.

7.1. Caracterização do produto em teste

A figura seguinte mostra a aparência do produto em teste, como se pode verificar pela escada comparativa, o produto apresentava uma distribuição de partículas de aproximadamente 3mm, a amostra da direita refere-se ao produto retirado da filtro instalado na admissão de ar do ciclone, sendo por isso o produto que o ciclone não demonstrou eficiência na separação, e por isso é o produto em que nos debruçaremos na nossa análise.



Figura 42 – Produto da esquerda – Aparência do produto antes e depois de transporte; Produto da direita - Produto não separado no ciclone.

A tabela seguinte apresenta os dados descritivos do produto utilizado nos testes, o formato da tabela manteve-se semelhante ao apresentado para os dados de produto de projeto e assim facilitar a comparação das duas tabelas.

O produto “Finos” não foi utilizado nos testes, de qualquer forma a linha de finos foi testada com o mesmo produto, por esse motivo a tabela de finos apresenta os mesmos valores da tabela de “Bons”.

Também podemos observar pela tabela de distribuição granulométrica que os valores mantiveram-se semelhantes aos adotados na fase de projeto, sendo que desta forma podemos efetuar uma comparação bastante idónea em relação aos dados de projeto.

Caracterização do produto testado		
Nome do Produto:	Fertilizante Orgânico	
	Bons	Finos *
ρ_p - Densidade das partículas [Kg/m ³]	500	500
d_p - Diâmetro da partícula [mm]	$1 \leq d_p \leq 3$	$1 \leq d_p \leq 3$
γ_{par} - Densidade da Partícula [Kg/m ³]	1000	1000
ω - Ângulo de Deslizamento [°]:	60	60
α - Ângulo de Repouso [°]	45	45
β - Ângulo de Escoamento [°]:	45	45
Higroscopia:	Sim	Sim
Teor de Humidade [%]:	10	10
Percentagem de Óleo [%]:	0	0
Abrasividade:	Muito Baixa	Muito Baixa
Propriedades de estáticas:	Não	Não
Toxidade:	Não	Não
Perigosidade:	Não	Não
Odor:	Intenso	Intenso

Tabela 18 – Tabela de caracterização do produto (* na linha de finos utilizou-se o mesmo produto por forma a testar a linha de finos).

Caracterização de local de instalação	
Local	Espanha Galiza
T_{amb} - Temperatura ambiente [°]	25
Φ - Teor de Humidade Relativa [%]	75
Z – Altitude [m]	478

Tabela 19 – Tabela descritiva do local de instalação.

0 – 20[μ m]	20 – 30[μ m]	30 – 40[μ m]	40 – 50[μ m]	50 – 60[μ m]	60 – 80[μ m]	> 80[μ m]
2,7 %	6,9%	9,4%	10,5%	10,5%	16,5%	43,5%

Tabela 20 – Distribuição granulométrica do tamanho das partículas de teste.

7.2. Resultados dos ensaios

Na tabela que se segue são apresentados os dados retirados na instalação, nas linhas de bons e finos, é de notar que os valores não apresentados deveu-se á não existência na altura dos testes de instrumentação para o efeito, no entanto a tabela apresenta os valores que deveriam ser retirados para uma correta avaliação dos sistema.

Linhas	Linha de Bons (1m3)		Linha de Bons (silos)		Linha de Finos	
	Vazio	Produto	Vazio	Produto	Vazio	Produto
Pressão Bomba [BAR]	-0,1	-0,4	-0,1	-0,2	-	-0,1
Pressão Filtro de Segurança da Bomba [BAR]	-0,1	-0,4	-0,1	-0,21	-	-0,1
Pressão Linha [BAR]	-0,09	-0,4	-0,081	-0,21	-	-0,2
Pressão entrada Ciclone [BAR]	-0,1	-0,6	-0,09	-0,4	-	-0,31
Pressão saída do Ciclone [BAR]	-	-	-	-	-	-
Quantidade de produto transportado [Kg]	-	520	-	1120	-	400
Caudal [Kg/h]	-	9400	-	9000	-	8000
Quantidade de produto não separado no ciclone [Kg]	-	0	-	0,100	-	0,010
Percentagem de produto não separado no ciclone [%]	-	0	-	0,0089	-	0,0025
Eficiência de separação [%]		100		99,9911		99,9975

Tabela 21 – Dados retirados dos ensaios retirados nas várias linhas de transporte.

Importa agora retirar conclusões sobre os dados obtidos relativamente á perda de carga nas linhas, para isso foram colocados os valores de perda de carga em fase de projeto e na fase de ensaio.

Linha de Bons (1m3)	Linha de Bons (Silo 1)	Linha de Bons (Silo 2)	Linha de Finos	Tipo
0,342	0,308	0,302	0,468	ΔP_t Projeto [kg/cm ²]
0,4	0,21	0,21	0,2	ΔP_t Ensaio [kg/cm ²]

Tabela 22 – Tabela comparativa dos valores de perda de carga nas diversas linhas de transporte pneumático.

Como verificamos no caso da linha de bons (1m3) obtivemos um valor de carga ligeiramente superior ao esperado, pelo que consideramos que se encontra dentro do valor de projeto. No caso da linha de bons para o enchimento dos silos obtivemos valores de pressão sensivelmente inferiores ao esperado, no entanto também este valor está dentro da gama de valores de pressão possíveis.

No caso mais discrepante encontra-se na linha de finos, sendo que esta discrepância se deve inteiramente ao tipo de produto que foi utilizado nos testes, com granulometrias menores o que provoca um aumento de rendimento da bomba de vácuo e consequentemente um aumento da depressão gerada.

Podemos ainda identificar a questão de os caudais serem menores do que o esperado, pelo que após afinações na diminuição de entrada de ar limpo na linha, vai consequentemente aumentar a perda de carga na mesma, por forma a aumentar o caudal de sólidos em transporte.

De qualquer das formas foi adotada uma margem em excesso de 20% no cálculo da velocidade no transporte dos sólidos, o que se traduziu também em maiores perdas de carga de projeto.

É de notar que a bomba selecionada suporta depressões até $0,8 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ o que transmite uma margem bastante aceitável para possíveis aumentos de perda de carga na instalação, por todos os motivos já anteriormente apresentados neste trabalho.

Quanto ao caudal de sólidos a transportar apresenta-se a tabela seguinte por forma a comparar os valores.

Linha de Bons (1m3)	Linha de Bons (Silo 1)	Linha de Bons (Silo 2)	Linha de Finos	Tipo
10000	10000	10000	10000	Caudal massico de projeto [Kg/h]
9400	9000	9000	8000	Caudal massico de ensaio [Kg/h]

Tabela 23 – Tabela comparativa dos valores de caudal massico nas diversas linhas de transporte pneumático.

Como já foi referido em todas as linhas o caudal mássico de sólidos foi inferior ao esperado, sendo que não foi considerado critico. É de referir que os ensais em questão não foram alvo de qualquer intervenção de afinação nas condutas por forma a melhorar estes valores. A instalação foi dotada de pontos de afinação de entrada de ar para assim introduzir modificações na relação gás/sólidos e assim melhorar os índices de transporte se sólidos



Figura 43 – Pontos de afinação de gás/sólidos na entrada de aspiração “ linhas de bons e finos – Ar “ junto das bombas de vácuo da instalação.



Figura 44 – Pontos de afinação de gás/sólidos na entrada de aspiração junto das tremonhas de 1m3 na linha de Bons.



Figura 45 – Pontos de afinação de gás/sólidos na entrada de aspiração junto dos silos na linha de Bons.

Em relação á eficiência de separação obtida nos ensaios foi feita uma análise granulométrica dos sólidos obtidos no filtro de proteção á bomba de vácuo, e portanto os sólidos que não foram separados nos ciclones.

Linha de Bons (1m3)	Linha de Bons (Silo 1)	Linha de Bons (Silo 2)	Linha de Finos	Tipo
0,991	0,991	0,991	0,991	Eficiência de separação de projeto [%]
100	99,9911	99,9911	99,9975	Eficiência de separação dos ensaios [%]

Tabela 24 – Tabela comparativa das eficiências de separação nas diversas linhas de transporte.

Por observação da tabela podemos verificar que os valores de projeto foram obtidos de forma analítica pelo Modelo Lapple, descriminados anteriormente neste trabalho, e

como se observa o ciclone foi calculado usando a distribuição granulométrica do produto “Bons” isto por simplicidade construtiva por forma a obter dois ciclones semelhantes para ambas as linhas.

Por este motivo a eficiência de separação é semelhante tanto para a linha de bons como para a linha de finos.

Como se observa por comparação dos valores de projeto e de testes, os valores de eficiência são bastante semelhantes o que nos leva a verificar uma grande consistência no Método Lapple usado.

Temos que tomar nota que na linha de bons do transporte de produto a partir da tremonha de 1m³ a eficiência foi de 100%, isto deveu-se essencialmente ao facto de o produto usado já tinha sido recirculado na linha de bons para os silos, o que levou a que as granulometrias de fraca eficiência do ciclone já não existiam pois já haviam sido separadas anteriormente.



Figura 46 – Ciclone da linha de Bons.



Figura 47 – Ciclone linha de finos.

Por forma a analisar com algum rigor foi feita uma análise granulométrica ao produto na separado no ciclone para assim se poder fazer com bastante rigor a análise das granolometrias não separadas no ciclone comparativamente aos dados de separação obtidos em projeto.

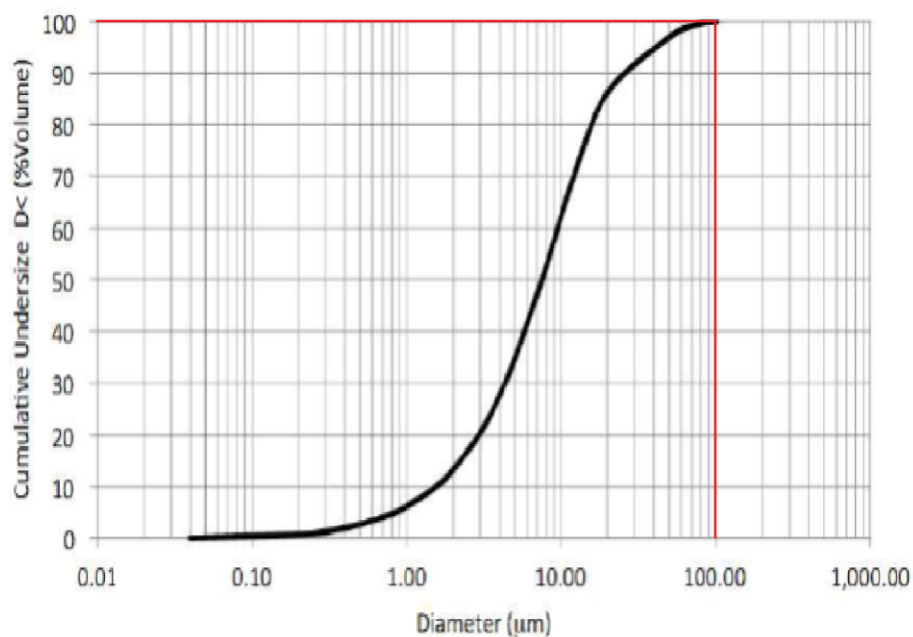


Figura 48 – Distribuição granulométrica da amostra recolhida.

Por análise do gráfico da figura 48 podemos observar que na amostra recolhida só foram encontradas partículas entre 0,04 [μm] e 100 [μm] sendo que estes extremos representavam 0 % da amostra. Esta observação leva-nos já a conclusão que partículas acima de 100 [μm] foram recolhidas no ciclone com uma eficiência de 100%. Comparativamente com os valores de projeto que estimávamos um valor de 99,8%, para partículas acima de 90 [μm]. Também em relação as eficiências de separação obtivemos nos cálculos valores muito próximos aos obtidos nos testes.

8. Conclusão e sugestão de trabalhos Futuros

Do trabalho realizado sobre sistemas de transporte pneumático em fase diluída é de notar os seguintes aspetos:

- Os modelos numéricos apresentados são bastante precisos para o produto abordado, sendo por isso, o uso destes modelos matemáticos para a abordagem de projeto;
- A elaboração do projeto com auxílio de ferramentas de desenho 3D demonstrou-se de extrema importância na obtenção de variáveis geométricas essenciais para o cálculo do sistema, sendo por isso de extrema importância o uso destas;
- O uso do método lapple apesar de estar já a alguns anos sem que tenha havido nenhum desenvolvimento do modelo, é bastante preciso nos seus resultados para elaboração da geometria do ciclone;
- O uso de *software* de cálculo por elementos finitos por forma a estudar o comportamento do ciclone, teve uma importância comparativa com o modelo, pois face aos bons resultados do modelo matemático torna-se um método bastante moroso de difícil abordagem para o uso em departamento de projeto.

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspetos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objeto de futura investigação:

- Elaboração de tabelas práticas de consulta para todos os produtos sugestíveis de transporte pneumático, essas tabelas deveram estar dotadas de todas as variáveis de cálculo necessárias para o cálculo dos sistemas de transporte pneumático;

- Elaboração de um *software* de cálculo automático para os sistemas de transporte pneumático por forma a reduzir o tempo de projeto com estes sistemas.

Referências bibliográficas

- [1] Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R., Leung L.S.† (2009). **Pneumatic Conveying of Solids. A Theoretical and Practical Approach**. Third Edition. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- [2] Milles D. (2004). **Pneumatic Conveying Design Guide**. Second Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [3] Schulze Dietmar (2008). **Powders and Bulk Solids - Behavior, Characterization, Storage and Flow**. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- [4] Henrique de Melo Lisboa, Waldir Nagel Schirmer (2007). **Metodologia de controlo de poluição atmosfera**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Montreal.
- [5] Silva Deodoro Ribeiro da (2005). **Transporte pneumático: tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. Artliber Editora.
- [6] Ricardo N. B. B. Monteiro (2005). **Transporte Pneumático vertical de Rolhas de cortiça**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
- [7] *Dynamic Air Coneveying Systems* (2003). **Princípios Fundamentais do transporte pneumático**.
- [8] *Dynamic Air Coneveying Systems* (2008). **16 conceitos de transporte pneumático**.
- [9] Jacob Thomas Roberts (2007). **Splitting Techniques in Vertical Pneumatic Conveying**. PhD thesis of University of Nottingham.
- [10] D. GELDART (1973). *Types of gas fluidization*. **Powder Technology**, Postgraduate School of Powder Technology. University of Bradford, Yorks. (Gt. Britain).
- [11] A.D SALMAN., A. VERBA, M. J. HOUNSLOW (2002). **Particle fragmentation in dilute phase pneumatic conveying**. *Powder Technology*.
- [12] GHADIRI M., SAMIMI A., BOEREFIJN R., GROOT A., KOHLUS (2003). **Effect of structural characteristics on impact breakage of agglomerates**. *Powder Technology*.
- [13] KONAMI M., TANAKA S., MATSUMOTO K. (2002). **Attrition of granules during repeated pneumatic transport**. *Powder Technology*.
- [14] JONES M. (1988). **Pneumatic Conveying**. *Handbook of Power Science*.

- [15] RIBEIRO D. S. (2005). **Transporte Pneumático - Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**, ARTLIBER.
- [16] GOMIDE R. (1983). **Operações Unitárias**. São Paulo.
- [17] MOLODTSOF Y, MOTTE JEROME. (2001). ***Predicting transport velocities***. *Powder Technology*.
- [18] RHODES M. (2004). **Transporte Pneumático de Partículas**. UFRN, Rio Grande do Norte.
- [19] SCHIAVON F. L. (2000). **Aplicação de técnicas de controlo ativo em transportadores pneumáticos de sólidos**. Faculdade de Engenharia Mecânica São Carlos, EESC/USP. Dissertação de Mestrado, São Paulo.
- [20] ZENZ F. A. (1949) ***Ind. Eng. Chem.***
- [21] SAVAGE S. B, PFEFFER R. and ZHAO Z. M. (1996). ***Solids transport, separation and classification***. *Powder Technology*.
- [22] KLINZING G. E, CABREJOS F. J. (1994). ***Pickup and saltation mechanisms of solid particles in horizontal pneumatic transport***. *Powder Technology*.
- [23] CURTIS J. S., KIMBERLY H. S., PARK K. (2003). ***Effect of particle characteristics on particle pickup velocity***. *Powder Technology*.
- [24] MOLERUS O. (1996). ***Overview: Pneumatic transport of solids***. *Powder Technology*.
- [25] BARTON S., MASON D. J. ***The effect of pipeline flow conditioning on low velocity gas-solids flow (paper no901)***.
- [26] LEUNG L. S., JONES P. J. (1978). ***Proceedings of Pneumotransport 4, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, paper C1***.
- [27] RIZK F. (1973). ***Proceedings of Pneumotransport 3, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, paper D4, 1973***.
- [28] MATSUMOTO S., HARADA S., SAITO S., MAEDA S. J. (1975). ***Chemical Engineering, Japan***.
- [29] KONNO H., SAITO S. J. (1969). ***Pneumatic conveying of solids through straight pipes. Chemical Engineering, Japan***.
- [30] HINKLE, B.L. (1953). ***PhD Thesis, Georgia Institute of Technology***.

- [31] SOMMERFELD M., KUSSIN J. (2004). ***Wall roughness effects on pneumatic conveying of spherical particles in a narrow horizontal channel***. *Powder Technology*.
- [32] www.continental-industrie.com [Online]
- [33] <http://webbif.ifi.unicamp.br/apostilas/f640/Cap6.pdf> [Online]
- [34] www.tuthillvacuumblower.com [Online]
- [32] www.sturtevantfan.com
- [33] www.wamgroup.com
- [34] www.dynamicair.com
- [35] www.powder.com.br
- [36] <http://www.polimak.com>
- [37] www.pedrogil.com

Anexos

Anexo A

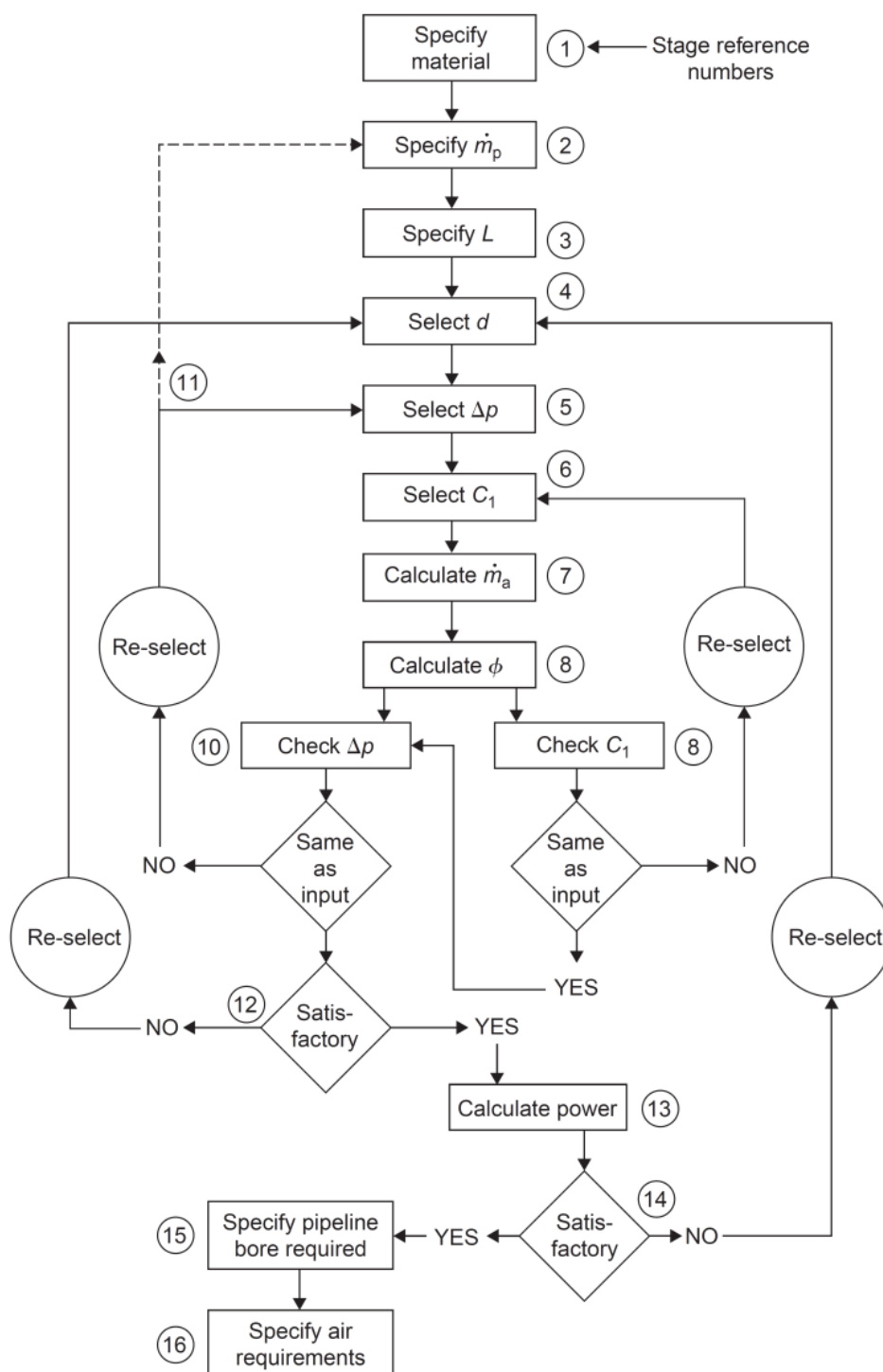


Figura 49 – Diagrama lógico de projeto pneumático baseado no modelo matemático [2].

Anexo B

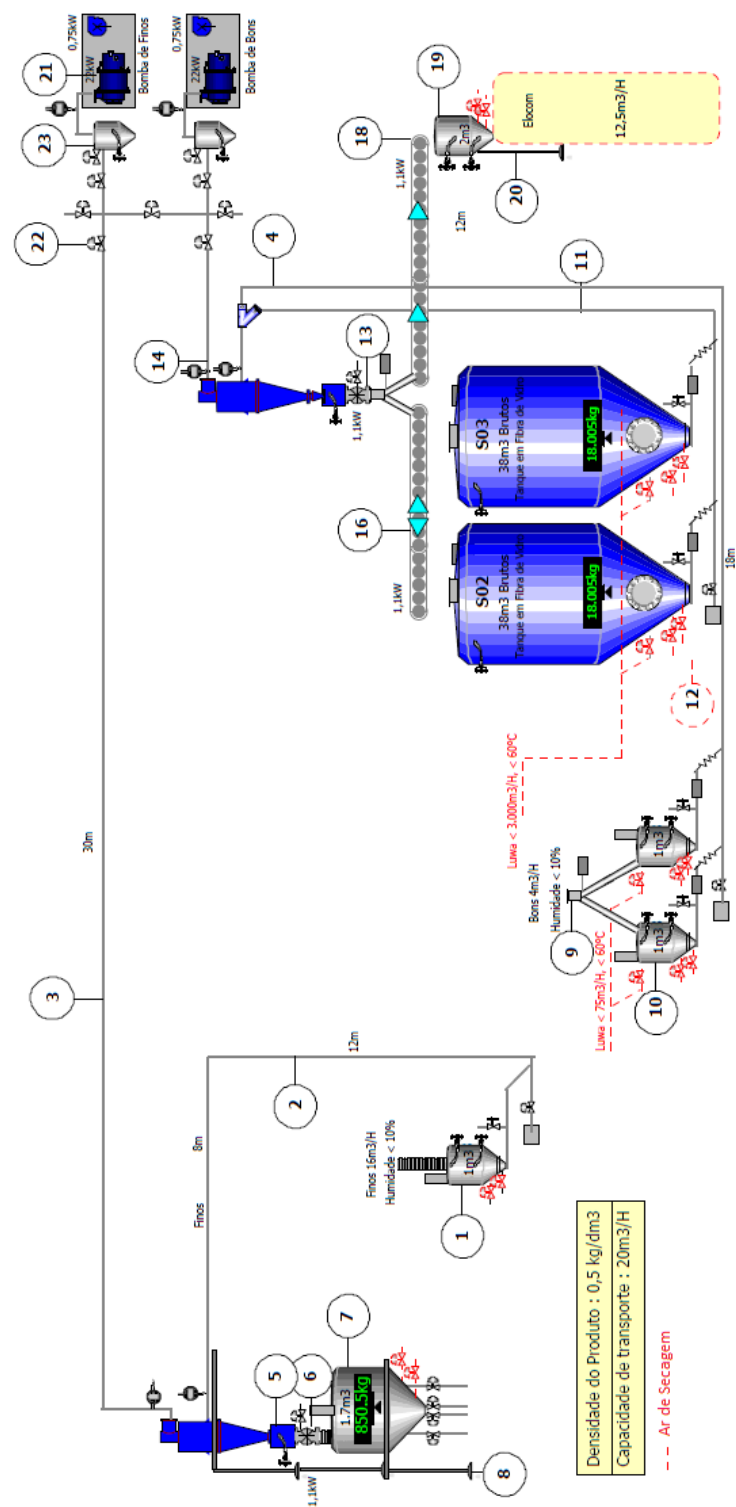


Figura 50 – Diagrama de processo.

Anexo C

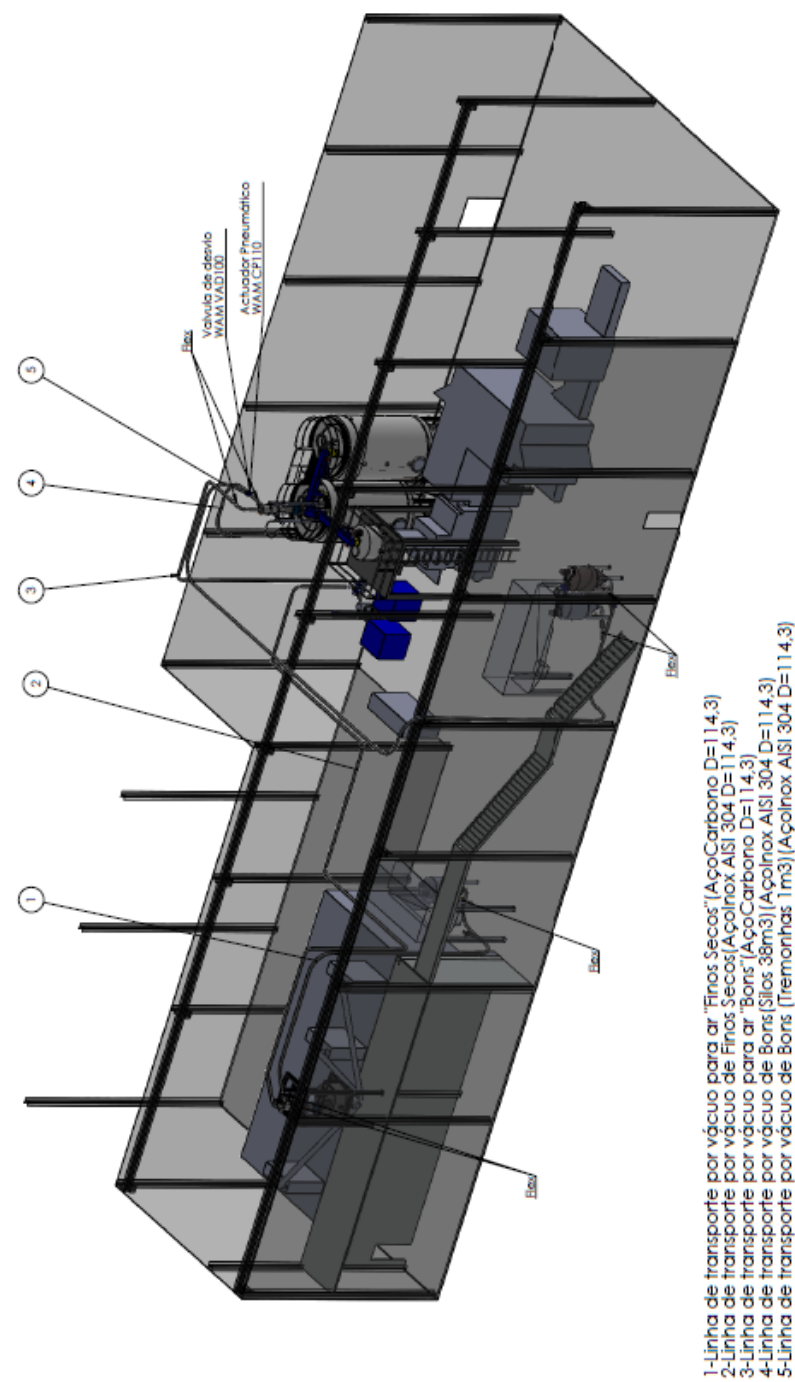


Figura 51 – Layout fabril com representação do traçado da tubagem-1.

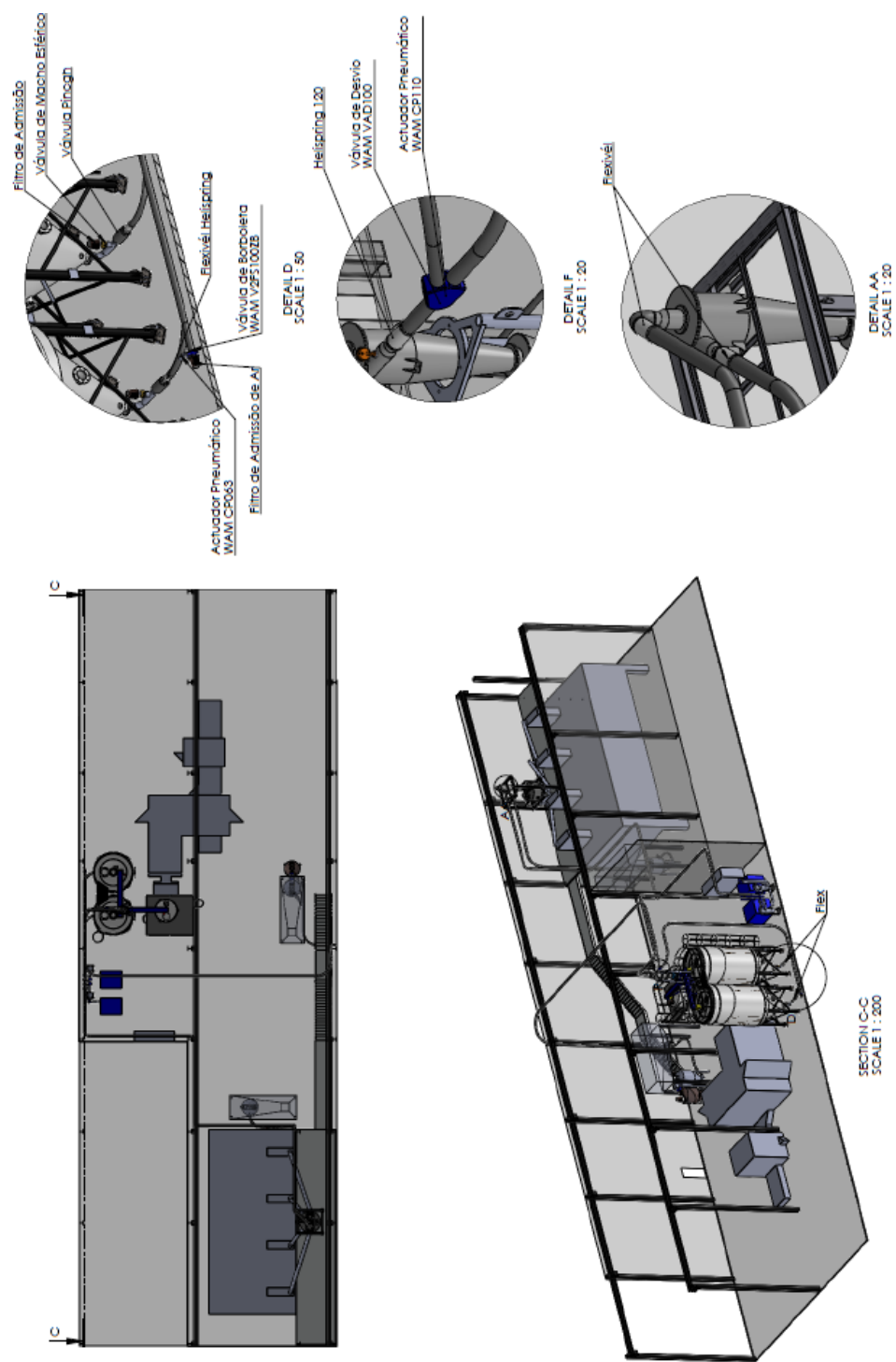


Figura 52 – Layout fabril com representação do traçado da tubagem-2.

Anexo D

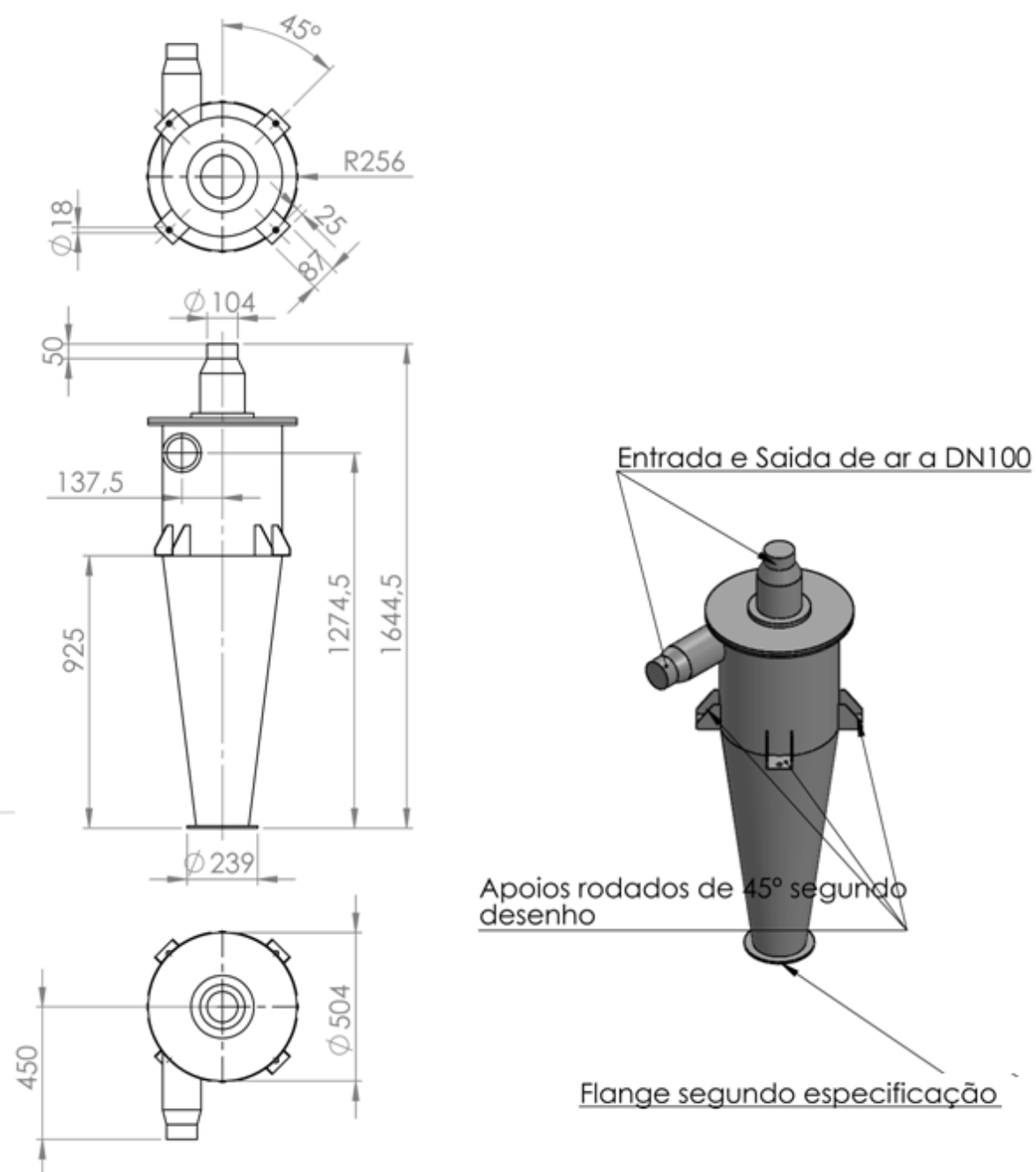


Figura 53 – Dimensões ciclone implementado.

Anexo E

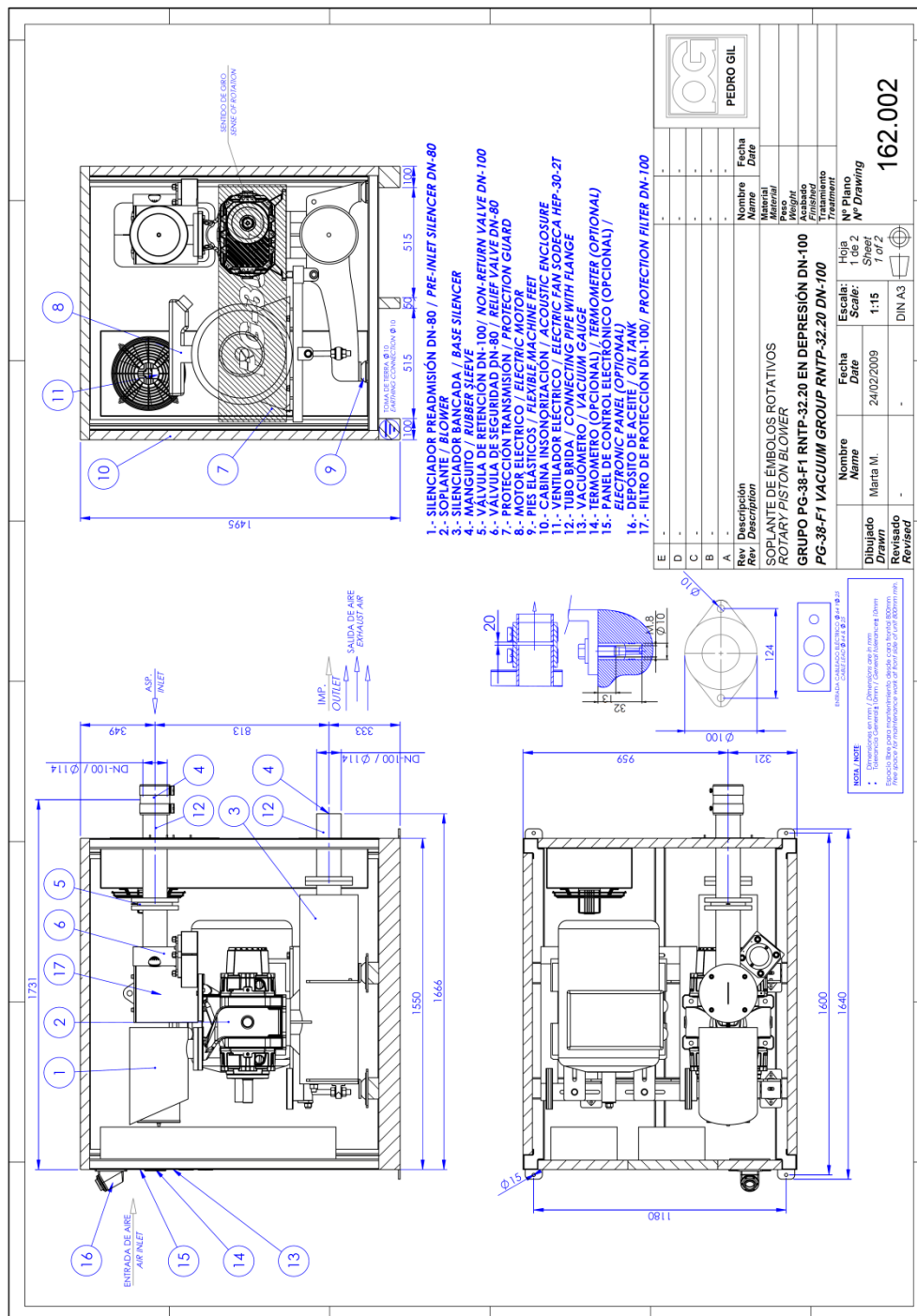


Figura 54 – Desenho de implementação bomba de vácuo Pedro Gil [37].

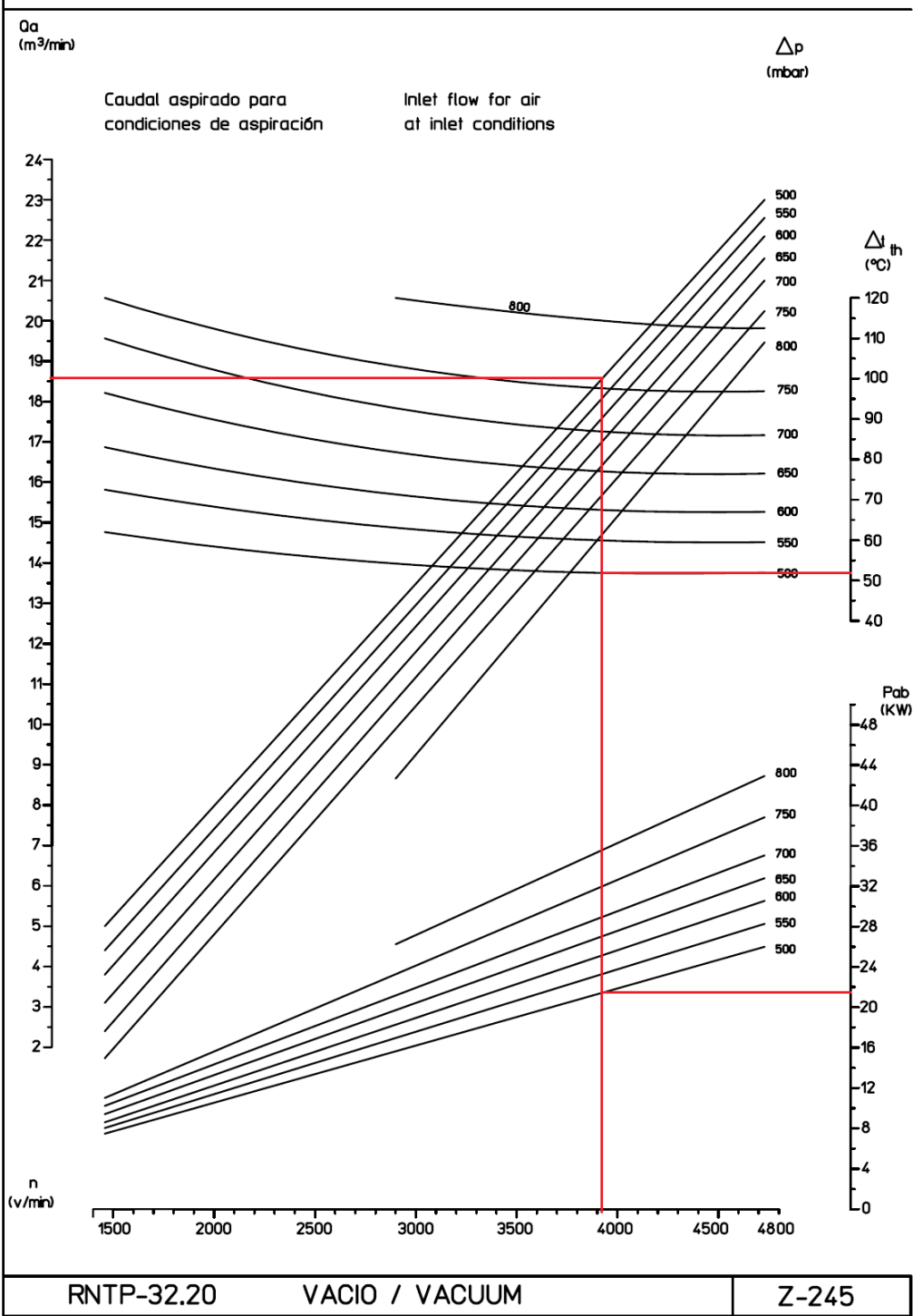


Figura 55 – Tabela de potência de bomba de vácuo RNT-32.20 [37].

Anexo F

Instalação	Galiza				
Produto	Fertilizante orgânico				
Densidade	1000Kg/m3				
Dimensão da Partícula	≥3mm				
Tubagem	Linha Bons dos 1m3				
Q - Caudal de ar	13,79882813	[ft3/s]	23,444358	[m3/min]	
Vg - Gas velocity [ft/s]	125	[ft/s]	2286	[m/min]	38,1 [m/s]
rg - Gas density [lbs/ft3]	0,07	[lbs/ft3]	1,1212924	[Kg/m3]	
C - Capacity of the sistem	6,2	[lbs/s]	10124,182	[Kg/h]	
W - Solids mass velocity [lbs/s ft2]	0,684421875	[lbs/s ft2]			
Vp - Particle velocity [ft/s]	100	[ft/s]	1828,8	[m/min]	30,48 [m/s]
f - Fanning friction factor	0,027933503				
LH - Equivalent length of pipeline Horizontal[ft]	190	[ft]	57,912	[m]	
LV - Equivalent length of pipeline Horizontal[ft]	100	[ft]	30,48	[m]	
D - Pipe inside diameter [ft]	0,375	[ft]	0,1143	[m]	
A - Area da tubagem	0,110390625	[ft2]			
g - Acceleration due to gravity [32.2 ft/s2]	32,2	[ft/s2]			
gc - Constant [32.174 ft-lb/lb s2]	32,174	[32.174 ft-lb/lb s2]			
K - Friction multiplier for the solids conveyed	0,5				
R - Solids to gas mass flow ration [lb/lb]	0,078219643	[lb/lb]			
Z - Elevation change in pipe line [ft]	42	[ft]	12,8016	[m]	
Nre - Reinolds Number	8940735,695				
ug - Gas Viscosity	0,000000367	[lbs/ft s]			
E - Pipe roughness factor (0.00015 for smooth pipes or 0.0005 for shot-peened pipes)	0,0005				
n	6				
APtHor -	1018,19178				
APtVer -	1018,876202				
Apacc - Pressure loss due to acceleration of the solids from their "at rest" condition at the pick up point.	0,014750471				
Apg - Frictional pressure loss of the gas	10,19947676				
Aps - Frictional pressure loss of the solids	0,398899715				
Ahg - Elevation pressure loss of the gas	0,020433165				
Ahs - Elevation pressure loss of the solids	0,001997844				
Ahmisc - Pressure losses from miscellaneous equipment	0,1				
Apt (PSI) - Total pressure loss in the system	10,73555796				
Apt (BAR) - Total pressure loss in the system	0,740190665				

Figura 56 – Folha de cálculo Excel para auxílio de cálculo de perda de carga para maiores de 3mm.

Instalação	Verdibéria / Galiza			
Produto	Fertilizante orgânico			
Densidade	500Kg/m3			
Dimensão da Partícula	≥3mm			
Tubagem	Linha Bons dos 1m3			
Q - Caudal de ar	10,04554688	[ft3/s]	17,067493	[m3/min]
Vg - Gas velocity [ft/s]	91	[ft/s]	1664,208	[m/min] 27,7368 [m/s]
rg - Gas density [lbs/ft3]	0,07	[lbs/ft3]	1,1212924	[Kg/m3]
C - Capacity of the sistem	6,2	[lbs/s]	10124,182	[Kg/h]
W - Solids mass velocity [lbs/s ft2]	0,684421875	[lbs/s ft2]		
Vp - Particle velocity [ft/s]	72,8	[ft/s]	1331,3664	[m/min] 22,18944 [m/s]
f - Fanning friction factor	0,027939211			
LH - Equivalent length of pipeline Horizontal[ft]	190	[ft]	57,912	[m]
LV - Equivalent length of pipeline Horizontal[ft]	100	[ft]	30,48	[m]
D - Pipe inside diameter [ft]	0,375	[ft]	0,1143	[m]
A - Area da tubagem	0,110390625	[ft2]		
g - Acceleration due to gravity [32.2 ft/s2]	32,2	[ft/s2]		
gc - Constant [32.174 ft-lb/lb s2]	32,174	[32.174 ft-lb/lb s2]		
K - Friction multiplier for the solids conveyed	0,5			
R - Solids to gas mass flow ration [lb/lb]	0,107444564	[lb/lb]		
Z - Elevation change in pipe line [ft]	42	[ft]	12,8016	[m]
Nre - Reinolds Number	6508855,586			
ug - Gas Viscosity	0,000000367	[lbs/ft s]		
E - Pipe roughness factor (0.00015 for smooth pipes or 0.0005 for shot-peened pipes)	0,0005			
n	6			
APtHor -	547,6020086			
APtVer -	548,5421486			
Apacc - Pressure loss due to acceleration of the solids from their "at rest" condition at the pick up point.	0,010738343			
Apg - Frictional pressure loss of the gas	5,406664021			
Aps - Frictional pressure loss of the solids	0,29045833			
Ahg - Elevation pressure loss of the gas	0,020433165			
Ahs - Elevation pressure loss of the solids	0,002744291			
Ahmisc - Pressure losses from miscellaneous equipment	0,1			
Apt (PSI) - Total pressure loss in the system	5,831038151			
Apt (BAR) - Total pressure loss in the system	0,402035928			

Figura 57 – Folha de cálculo Excel para auxílio de cálculo de perda de carga para menores de 3mm.